



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**VÝZKUM EFEKTIVNÍCH ZPŮSOBŮ ODSÁVÁNÍ**

RESEARCH ON EFFECTIVE METHODS OF EXHAUSTING

**DIZERTAČNÍ PRÁCE**

DOCTORAL THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Ing. Ondřej Pech**

**ŠKOLITEL**

SUPERVISOR

**prof. Ing. Milan Pavelek, CSc.**

**BRNO 2017**



## **ABSTRAKT**

Při výrobních technologiích jsou často generovány a uvolňovány různé plynné látky, které jsou mnohdy zdraví škodlivé. Do pracovního prostředí se těchto látek tedy musí dostávat co nejmenší množství. Nejvyšší účinnost zachycení plyných škodlivin umožňuje lokální odsávání. Jeho nevýhodou je nutnost co nejlépe obklopit zdroj škodlivin nebo být zdroji co nejbližší, což většinou není technicky nebo technologicky možné. Možnou alternativou je využití zesíleného odsávacího systému, který dosahuje větších zachytných vzdáleností. V rámci dizertační práce byla provedena rešerše zesílených odsávacích systémů. Následně byla upravena stávající měřicí trať pro měření s přepážkou nad štěrbinovým sacím nástavcem a současně byla měřicí trať částečně automatizována. Pro postihnutí případu škodliviny s hustotou menší než vzduch byl pracovní stůl přesunut nad odsávací štěrbinu. Na základě rešerše byla navržena úprava štěrbinového zesíleného odsávacího nástavce, která spočívala v úpravě přívodu vzduchu. Místo přívodní štěrby bylo využito soustavy dírek a soustavy trubiček pro vyšší turbulizaci proudění a tím zvýšení účinnosti odsávání. Následně byly přívodní proudy ze štěrby, dírek i trubiček vizualizovány kouřovou metodou. Dále bylo provedeno měření účinnosti odsávání metodou stopového plynu a měření rychlostních polí před navrženými konfiguracemi štěrbinového zesíleného sacího nástavce. V závěru výzkumných prací bylo provedeno zhodnocení energetické náročnosti všech způsobů odsávání měřením příkonu ventilátorů a výpočtem ztrátového příkonu.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Lokální odsávání, zesílený odsávací systém, REEXS, štěrbinový sací nástavec.

## **SUMMARY**

Many production technologies generate a variety of gas pollutants, which are unhealthy. The aim is therefore to minimize the content of such gas pollutants in the work environment. The highest capture efficiency of gas pollutants offers the local exhausting. Its disadvantage is the necessity to surround the source of pollutants, or to be as close as possible which is usually not technically or technologically possible. A possible alternative is to use a reinforced exhaust system that achieves greater capture distances. In the initial stage of the solution of the dissertation, a review of reinforced exhaust systems was carried out. Further, an existing measurement system was modified for measurements with the partition above the exhaust slot and the measurement system was partially automated. In order to investigate the case with pollutants having a lower density than the air, the workbench - the partition was moved above the exhaust slot. Based on of the literature review, a modification of the reinforced slot exhaust system was proposed. The modification consisted in the adjustment of the air inlet adjustment where a set of holes and a tube assembly were used instead of the slot. Such setup allowed for higher flow turbulence and thus for an increased exhaust efficiency. Subsequently, the inlet streams from the slot, holes and tubes were visualized by the smoke method. Further measurements were carried out by the tracer gas method for the determination of the exhaust efficiency. Measurements of velocity fields in front of the proposed configurations of the reinforced slot exhaust hood were also carried out. In conclusion, an energy performance assessment was carried out by means of the measurement of the electric power input to the fans with the determination of the electric loss power.

## **KEYWORDS**

Local exhaust system, reinforced exhaust system, REEXS, slot exhaust hood.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

PECH, O. *Výzkum efektivních způsobů odsávání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 128 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Milan Pavelek, CSc.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem dizertační práci *Výzkum efektivních způsobů odsávání* vypracoval samostatně pod vedením svého školitele prof. Ing. Milana Pavelka, CSc. s použitím podkladů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

.....  
Ing. Ondřej Pech

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych rád poděkoval svému školiteli a vedoucímu dizertační práce prof. Ing. Milanu Pavelkovi, CSc. za odborné vedení, podporu, cenné rady a připomínky po celou dobu řešení tématu dizertační práce a za svůj čas, který mi věnoval. Poděkování patří rovněž kolegům Ing. Jiřímu Hejčíkovi, Ph.D., Ing. Lubomíru Klimešovi, Ph.D. a Ing. Tomáši Mauderovi, Ph.D. za nesčetné rady a diskuze nad dílčími problémy tématu dizertační práce.

Zároveň bych chtěl poděkovat svým rodičům a bratrovi za podporu, kterou mi během celého vysokoškolského studia poskytovali. Mé poděkování také patří Radce za její lásku, pochopení a trpělivost.

Ing. Ondřej Pech





# OBSAH

1	Větrání .....	16
1.1	Teoretický popis proudění.....	16
1.2	Větrací systémy .....	19
1.3	Lokální odsávání .....	19
1.4	Sací nástavce .....	21
2	Zesílený odsávací systém.....	26
2.1	Zesílený odsávací systém v praxi.....	35
3	Měřicí trať .....	36
3.1	Zesílený štěrbinový sací nástavec .....	39
3.2	Vířič.....	44
3.3	Měřicí systém .....	45
3.4	Měření účinnosti odsávání .....	50
3.5	Měření rychlostního pole .....	55
3.6	Vizualizace kouřovou metodou.....	59
3.7	Měření příkonu .....	60
3.8	Měření tlakové ztráty .....	61
4	Vizualizace proudění z přívaděcí výstky .....	62
5	Výsledky měření účinnosti odsávání štěrbinového sacího nástavce.....	66
5.1	Výsledky účinnosti odsávání ve volném prostoru – přívod dvěma štěrbinami... 66	
5.2	Výsledky měření účinnosti odsávání s pracovním stolem v úrovni spodní hrany příruby – přívod štěrbinou.....	68
5.3	Výsledky měření účinnosti odsávání s pracovním stolem v úrovni spodní hrany odsávací štěrby – přívod štěrbinou.....	70
5.4	Výsledky měření účinnosti odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany příruby – přívod štěrbinou.....	72
5.5	Výsledky měření účinnosti odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby – přívod štěrbinou.....	74
5.6	Výsledky měření účinnosti odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany příruby – přívod dírkami .....	75
5.7	Výsledky měření účinnosti odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby – přívod dírkami .....	77
5.8	Výsledky měření účinnosti odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany příruby – přívod trubičkami .....	78
5.9	Výsledky měření účinnosti odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby – přívod trubičkami .....	80
5.10	Porovnání účinnosti odsávání v ose odsávací štěrby s přepážkou v úrovni horní hrany příruby .....	81
5.11	Porovnání účinnosti odsávání v ose odsávací štěrby s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby .....	84

6	Výsledky měření rychlostních polí štěrbinového sacího návstave	86
6.1	Výsledky měření rychlostního pole s pracovním stolem v úrovni spodní hrany odsávací štěrby – přívod štěrby	86
6.2	Výsledky měření rychlostního pole s přepážkou v úrovni horní hrany přírby – přívod štěrby	88
6.3	Výsledky měření rychlostního pole s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby – přívod štěrby	89
6.4	Výsledky měření rychlostního pole s přepážkou v úrovni horní hrany přírby – přívod dírkami	91
6.5	Výsledky měření rychlostního pole s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby – přívod dírkami	93
6.6	Výsledky měření rychlostního pole s přepážkou v úrovni horní hrany přírby – přívod trubičkami	94
6.7	Výsledky měření rychlostního pole s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby – přívod trubičkami	96
6.8	Porovnání rychlostí v ose odsávací štěrby s přepážkou v úrovni horní hrany přírby	97
6.9	Porovnání rychlostí v ose odsávací štěrby s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby	99
7	Energetická náročnost sacích návstavů	101
7.1	Energetická náročnost experimentálního zařízení	101
7.2	Energetická náročnost sacího návstave	104
8	Nejistoty měření	107
8.1	Nejistoty přímých měření	107
8.1.1	Nejistoty typu A	107
8.1.2	Nejistoty typu B	108
8.1.3	Nejistoty typu C	108
8.2	Nejistoty nepřímých měření	109
8.3	Nejistoty měření experimentálního zařízení	109
8.3.1	Nejistoty měření teploty	109
8.3.2	Nejistoty měření barometrického tlaku	109
8.3.3	Nejistoty měření tlakové difference	109
8.3.4	Nejistoty měření tlaku před průtokoměry	110
8.3.5	Nejistoty absolutních tlaků před průtokoměry	110
8.3.6	Nejistoty měření průtoku přiváděného a odsávaného vzduchu	110
8.3.7	Nejistoty měření rozměrů přiváděcí a odsávací štěrby	111
8.3.8	Nejistoty nastavení pracovního parametru I	111
8.3.9	Nejistoty měření koncentrace CO <sub>2</sub> v odsávaném vzduchu	112
8.3.10	Nejistoty měření koncentrace CO <sub>2</sub> na pozadí	112

8.3.11	Nejistoty účinnosti odsávání .....	112
8.3.12	Nejistoty měření rychlostního pole .....	113
8.3.13	Nejistoty měření příkonu.....	113
9	Závěr .....	114
10	Seznam použitých zdrojů.....	117
11	Vlastní publikace vztahující se k tématu dizertační práce .....	123
12	Další vlastní publikace .....	124
13	Seznam použitých symbolů .....	125



## **VYMEZENÍ CÍLŮ DIZERTAČNÍ PRÁCE**

Dílčí cíle dizertační práce lze v souladu se závěry státní doktorské zkoušky formulovat do následujících bodů:

- Provedení úprav zesíleného sacího systému v blízkosti pracovního stolu pro zvýšení účinnosti odsávání.
- Proměření účinnosti odsávání a obrazů proudění na upraveném zařízení.
- Zhodnocení energetické náročnosti zařízení.



## ÚVOD

V průmyslové výrobě jsou výrobními technologiemi generovány různé exhaláty. Tyto exhaláty (plynné, kapalné, ale i pevné) jsou převážně zdraví škodlivé, a proto jejich množství v pracovním prostředí musí být co nejnižší a nesmí překročit nejvyšší přípustnou koncentraci ve vzduchu. Pro snížení koncentrace škodlivin v pracovním prostředí se obvykle používá nucené větrání, které je možné rozdělit na celkové větrání a lokální větrání.

Celkové větrání reguluje koncentraci škodlivin ve větraném prostoru ředěním škodlivin přívodem čerstvého vzduchu. Oproti tomu lokální větrací systémy odsávají znečištěný vzduch přímo u zdroje jejich vzniku, tím snižují zatížení větraného prostoru škodlivinami, čímž snižují také energetické nároky na větrání.

Nevýhodou lokálních větracích systémů je, že rychlost vzduchu před sacím nástavcem se zvětšující se vzdáleností rychle klesá. Z toho důvodu je nutné umístit vyústění nástavce co nejbližší ke zdroji znečištění, což může interferovat s výrobní technologií nebo omezovat pracovníka, a proto tito pracovníci často nepoužívají žádné lokální odsávání. Při návrhu sacího nástavce by měla být také zajištěna dostatečná rychlost odsávaného proudu vzduchu blízko zdroje škodlivin, která musí být větší než rychlost šířící se škodliviny. První možností je omezení odsávání pouze na prostor, ve kterém jsou generované škodliviny např. přírubou nebo ve větším rozsahu nějakým typem obestavení např. pracovním stolem – přepážkou, či částečným nebo úplným zákrytem. Možnou alternativu skýtá využití zesíleného odsávacího systému, který využívá kromě odsávání ještě přívodu vzduchu pro intenzifikování a prodloužení účinné oblasti odsávání. Kombinací tohoto zesíleného odsávacího systému s obestavením pomocí pracovního stolu – přepážky lze prodloužit účinnou oblast ale také zvýšit celkovou účinnost odsávání bez výrazného omezení pracovníka. Na účinnost a dosah odsávání mají také vliv vlastnosti generované škodliviny. Pokud má škodlivina větší hustotu než vzduch, může docházet při použití pracovního stolu k jejímu zachycení pracovním stolem a následnému odsátí, čímž se může účinnost ještě dále zvětšovat. Při generování škodliviny s menší hustotou než má okolní vzduch se dosah odsávání může zkracovat.

Předkládaná dizertační práce se věnuje zesílenému odsávacímu systému v blízkosti pracovního stolu – přepážky, na kterém byly navrženy a provedeny úpravy přívodu vzduchu pro zvýšení účinnosti odsávání. Účinnost odsávání byla zkoumána metodou stopového plynu, kdy se stopový plyn ( $\text{CO}_2$ ) přivádí ve zvolených místech před sacím nástavcem a je vyhodnocována koncentrace stopového plynu v odsávaném vzduchu. Jelikož má použitý stopový plyn větší hustotu než okolní vzduch, bylo přistoupeno k úpravě polohy přepážky. Přepážka byla přesunuta nad odsávací šterbinu, což modeluje pracovní stůl se škodlivinami lehčími než vzduch, např. od svařování, pájení aj. Poté byla změřena účinnost odsávání původního a upraveného zesíleného sacího nástavce s přepážkou ve dvou polohách nad odsávací šterbinou.

Byly také vizualizovány výstupní proudy přiváděného vzduchu, proměřena rychlostní pole a porovnány energetické náročnosti jednotlivých konfigurací zesíleného odsávacího systému s přepážkou ve dvou polohách nad odsávací šterbinou.

# 1 VĚTRÁNÍ

Větrání zajišťuje čisté ovzduší ve vnitřních prostorech, kterého se dosahuje výměnou vzduchu ve vnitřních prostorech za vzduch venkovní. Problematiku větrání je možné řešit pomocí empirických a numerických metod nebo experimentálně.

## 1.1 Teoretický popis proudění

Proudění při větrání ve volných větraných prostorech, ale také v omezených větracích systémech je možné popsat pomocí Navier-Stokesových diferenciálních rovnic, které pro 3D laminární nestacionární proudění (pro směry  $x, y, z$ ) mají tvar (Schlichting a Gersten 2017):

$$w_x \cdot \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial w_x}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial w_x}{\partial z} + \frac{\partial w_x}{\partial \tau} = \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + g_x, \quad (1.1)$$

$$w_x \cdot \frac{\partial w_y}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial w_y}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial w_y}{\partial z} + \frac{\partial w_y}{\partial \tau} = \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + g_y, \quad (1.2)$$

$$w_x \cdot \frac{\partial w_z}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial w_z}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial w_z}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial \tau} = \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + g_z, \quad (1.3)$$

kde:

$w_{x,y,z}$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	– složky rychlosti ve směru $x, y, z$ ,
$\tau$	$[\text{s}]$	– čas,
$\nu$	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	– kinematická viskozita,
$\rho$	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	– hustota.

První 3 členy na levé straně představují zrychlení stacionárních setrvačných sil. Poslední člen na levé straně je zrychlení nestacionárních setrvačných sil. Na pravé straně představuje první člen zrychlení třecích sil, druhý člen je zrychlení tlakových sil a třetí člen zrychlení tíhových sil.



Práce je zaměřena na odsávací systémy, a mnohé z nich je možné matematicky modelovat v rovině pomocí Navier-Stokesových diferenciálních rovnic pro 2D proudění. Pro rovinu  $x$ - $z$  zavedenou dále v práci (kde tíhové zrychlení působí v ose  $z$ ) a pro stacionární proudění platí:

$$w_x \cdot \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_z \cdot \frac{\partial w_x}{\partial z} = \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1.4)$$

$$w_x \cdot \frac{\partial w_z}{\partial x} + w_z \cdot \frac{\partial w_z}{\partial z} = \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + g_z, \quad (1.5)$$

Úpravou rovnic (1.4) a (1.5) je možné odvodit Archimedovo číslo, které dává informaci o stupni neizotermičnosti proudu, nebo v uvedeném případě rozdílné hustotě proudu vůči hustotě okolního plynu a je vyjádřeno poměrem sil vztlakových k silám setrvačným, působících na částice plynu.

Nejdříve je nutné definovat zrychlení od vztlakových sil. Pro vztlakovou sílu na jednotku objemu lze psát:

$$G = -(\rho - \rho_\infty) \cdot g = -\rho_\infty \left( \frac{\rho}{\rho_\infty} - 1 \right) \cdot g = -\rho_\infty \left( \frac{\rho - \rho_\infty}{\rho_\infty} \right) \cdot g, \quad (1.6)$$

Do rovnice (1.5) je pak třeba dosadit za zrychlení  $g_z$  matematický výraz:

$$\frac{G}{\rho_\infty} = -g \cdot \frac{\rho - \rho_\infty}{\rho_\infty} = -g \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho_\infty}, \quad (1.7)$$

Dosazením rovnice (1.7) do rovnice (1.5) dostaneme pro směr  $z$  vztah:

$$w_x \cdot \frac{\partial w_z}{\partial x} + w_z \cdot \frac{\partial w_z}{\partial z} = \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} - g \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho_\infty}, \quad (1.8)$$

Pro definování poměrů při odsávání škodlivin lze pak z členů na levé straně pohybové rovnice (1.5) a posledního členu vpravo odvodit Archimedovo číslo:

$$A_r = \frac{g \cdot \Delta\rho \cdot L}{\rho_\infty \cdot w^2}, \quad (1.9)$$

kde:

$G$	$[\text{N} \cdot \text{m}^{-3}]$	– výsledná vztlaková síla na jednotku objemu,
$A_r$	$[1]$	– Archimedovo číslo,
$g$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$	– tíhové zrychlení,
$\Delta\rho$	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	– rozdíl hustoty škodliviny a hustoty vzduchu,
$\rho$	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	– hustota škodliviny,
$\rho_\infty$	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	– hustota vzduchu,
$L$	$[\text{m}]$	– charakteristický rozměr výustky,
$w$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	– rychlost proudění.

V případě odsávání je výhodné mít informaci o směru výslednice sil působících na odsávaný plyn. Pokud tíhové zrychlení v souřadném systému směřuje proti směru osy  $z$ , bude kladné Archimedovo číslo označovat plyn pohybující se ve směru osy  $z$  (stoupající

přirozené proudy) a naopak bude-li Archimedovo číslo záporné, bude se plyn pohybovat proti směru osy  $z$  tj. ve směru tíhové zrychlení.

Např. pro vzduchotechnické výustky při přívodu teplého nebo studeného vzduchu do místnosti při  $|A_r| \leq 0,001$  jde o proud mírně neizotermní a silně neizotermní při  $|A_r| > 0,01$ . Nejvýraznějším účinkem vztlakových sil je vertikální ohyb proudu. U proudů s malým rozdílem hustot lze předpokládat, že se v prostoru osy proudů šíří přímočaře, obdobně jako izotermní proudy vzduchu z příváděcích vzduchotechnických výustek (Janotková 1991).

Pokud je třeba řešit proudění v potrubí, části větracího systému nebo ve výustce, ale také pro hodnocení energetické náročnosti těchto zařízení, je možné použít 1D systém. Pro stacionární proudění bez ztrát dostaneme tzv. Bernoulliho rovnici:

$$-\frac{dp}{\rho} = w \cdot \frac{dw}{dx}, \quad (1.10)$$

kde:

$p$  [Pa] – tlak.

Po vynásobení této rovnice hmotnostním tokem bude:

$$-\dot{V} \cdot dp = \dot{m} \cdot d\left(\frac{w^2}{2}\right), \quad (1.11)$$

kde:

$\dot{V}$  [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>] – objemový průtok

$\dot{m}$  [kg·s<sup>-1</sup>] – hmotnostní průtok.

Po integraci při uvažování izochorického<sup>1</sup> děje a rozšíření o ztráty při proudění lze psát:

$$\dot{V} \cdot (p_1 - p_2) = \dot{V} \cdot \rho \cdot \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + P_z, \quad (1.12)$$

$$\dot{V} \cdot \left[ \left( p_1 + \rho \cdot \frac{w_1^2}{2} \right) - \left( p_2 + \rho \cdot \frac{w_2^2}{2} \right) \right] = P_z, \quad (1.13)$$

$$\dot{V} \cdot [p_{1,c} - p_{2,c}] = P_z, \quad (1.14)$$

kde:

$P_z$  [J·s<sup>-1</sup>] – ztrátový příkon (příkon potřebný pro překonání ztrát v úseku mezi tlaky  $p_{1,c}$  a  $p_{2,c}$ ),

$\rho$  [kg·m<sup>-3</sup>] – hustota vzduchu,

$p_{1,2}$  [Pa] – statické tlaky v místě 1 a 2,

$p_{1,c}$  [Pa] – celkový tlak v místě 1,

$p_{2,c}$  [Pa] – celkový tlak v místě 2.

<sup>1</sup> Integraci je možné také provést při uvažování adiabatického děje. Pro rychlosti proudění do 0,3 rychlosti zvuku je však rozdíl ve výsledném ztrátovém příkonu minimální.

## 1.2 Větrací systémy

Pro zajištění čistého ovzduší ve vnitřních prostorech se využívá větrání, kterým se provádí výměna vzduchu ve vnitřních prostorech za vzduch venkovní. Výměnu vzduchu je možné dosáhnout přirozeným větráním (provětrávání<sup>2</sup>, infiltrace<sup>3</sup>, aerace<sup>4</sup>, šachtové větrání<sup>5</sup>) využívajícího různých hustot vnitřního a venkovního vzduchu, nebo nuceným větráním pomocí větracích systémů. Přirozené a nucené větrání je také možné kombinovat.

Nucené větrání využívá systémy, které přivádí čerstvý vzduch nebo odvádí znečištěný vzduch z místnosti, případně je využívána kombinace obou možností. Pro posouzení typu větrání zavádíme bezrozměrnou veličinu, poměr objemových toků vzduchu přiváděného a odváděného, nazývanou součinitel větrací rovnováhy  $\varepsilon$  (Janotková 1991):

$$\varepsilon = \frac{\dot{V}_{př}}{\dot{V}_{od}} \quad (1.15)$$

kde:

$\varepsilon$	[1]	– součinitel větrací rovnováhy,
$\dot{V}_{př}$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	– objemový průtok vzduchu nuceně přiváděného,
$\dot{V}_{od}$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	– objemový průtok vzduchu nuceně odváděného.

Pro

$\varepsilon < 1$  – **podtlakové větrání** – je využíváno tam, kde je nutné zabránit pronikání vzduchu se škodlivinami do okolních místností.

$\varepsilon = 1$  – **rovnotlaké větrání** – nevzniká při něm rozdíl tlaků mezi větraným a vnějším prostorem. Používá se, pokud nemá docházet k proudění mezi těmito prostory.

$\varepsilon > 1$  – **přetlakové větrání** – se používá tam, kde je potřeba zabránit pronikání vzduchu z okolních prostorů (operační sály, laboratoře) (Janotková 1991).

Nucené větrání lze dále rozdělit na větrání celého prostoru nebo pouze jeho části. Poté hovoříme o tzv. celkovém a lokálním větrání.

Celkové větrání je využíváno v případě rovnoměrně zastoupených škodlivin v prostoru, nebo pokud nelze předem určit místo vzniku škodlivin. Oproti tomu lokální větrání se navrhuje do prostorů s většími zdroji škodlivin soustředěnými do vymezeného prostoru. Lokální větrání je možné využít pro přívod čerstvého vzduchu do míst pobytu lidí tzv. lokální zavzdušnění (vzduchová sprcha, oáza, clona). Druhou variantou je lokální odsávání, tj. odvod škodlivin od zdroje jejich vzniku.

## 1.3 Lokální odsávání

Lokální odsávání zajišťuje odsávání škodlivin nebo nadměrného tepla v místě jejich vzniku a odvedení z místnosti, případně jeho filtrace a recirkulace do místnosti. Koncentrace škodlivin v odváděném vzduchu bývají podstatně vyšší než u celkového větrání, kde koncentrace v prostoru nesmí překročit nejvyšší přípustné hygienické limity. Díky tomu lokální odsávání snižuje zatížení větraného prostoru škodlivinami, a současně snižuje také nároky na celkové větrání. Z tohoto důvodu je také pro stejný zdroj škodlivin úspornější než celkové větrání.

---

<sup>2</sup> Přirozené větrání otevíráním okny.

<sup>3</sup> Nebo také provzdušňování je přirozené větrání netěsnostmi spárami oken a dveří.

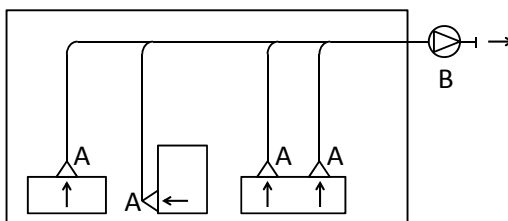
<sup>4</sup> Přirozené větrání regulovatelnými větracími otvory ve stěnách a ve střeše.

<sup>5</sup> Přirozené větrání, při kterém dochází k odvodu větracího vzduchu šachtou (komínem).

Lokální odsávání se nejčastěji používá u ručních operací, svářecích či pájecích stolů, výrobních linek apod. (Janotková 1991).

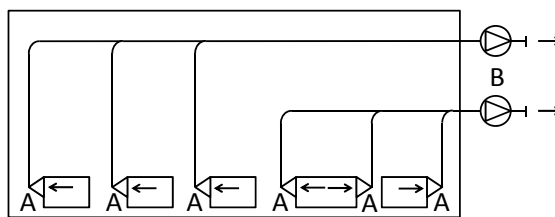
Lokální odsávací zařízení je možné dělit na ústřední, skupinová, jednotková a dělená.

Ústřední odsávací zařízení (obr. 1.1) odsává jedním ventilátorem (B) umístěným mimo pracovní prostory škodliviny z několika zdrojů pomocí potrubní sítě a sacích nástavců (A). Odsávaný vzduch je poté odváděn do vnějšího ovzduší (Janotková 1991).



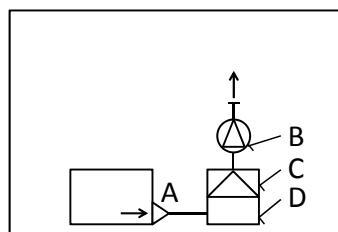
Obr. 1.1 – Ústřední odsávací zařízení  
(Janotková 1991)

Skupinové odsávací zařízení (obr. 1.2) odsává více ventilátory (B) od skupin zdrojů sacími nástavci (A), aby se odsávané látky nemísili. Tohoto typu je využíváno v případech, kdy by po smíšení mohly vznikat výbušné nebo jedovaté sloučeniny (Janotková 1991).



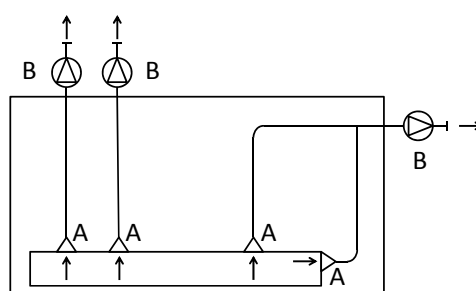
Obr. 1.2 – Skupinové odsávací zařízení  
(Janotková 1991)

Jednotkové odsávací zařízení (obr. 1.3) se skládá z ventilátoru (B), odlučovače prachu nebo filtru (C), zásobníku prachu (D) a sacího nástavce (A). Jsou využívány zejména pro odsávání od prašných zdrojů. Umisťují se v blízkosti zdroje škodlivin a vzduch se po vyčištění vrací zpět na pracoviště (Janotková 1991).



Obr. 1.3 – Jednotkové odsávací zařízení  
(Janotková 1991)

Dělené odsávací zařízení (obr. 1.4) je složeno z několika samostatných ventilátorů (B) se sacími nástavci (A), které jsou napojeny na stejnou technologickou linku. Jejich využití má smysl u velkých rozměrných linek případně se dají aplikovat u technologií, kde se na několika místech vyvíjejí chemicky totožné škodliviny, avšak o různé intenzitě (Janotková 1991).



Obr. 1.4 – Dělené odsávací zařízení  
(Janotková 1991)

## 1.4 Sací nástavce

Důležitou součástí zařízení pro lokální odsávání je sací nástavec, který zachycuje škodliviny v místě jejich vzniku a jehož konstrukcí je možné značně ovlivnit množství zachycených škodlivin.

Existuje několik hlavních typů sacích nástavců (Janotková 1991):

- Odsávací skříně, kabiny pro stříkání nátěrových hmot, tryskání odlitků, chemické digestoře apod.
- Odsávací zákryty – jsou střešovité či tvarově přizpůsobené strojům (kovoobráběcím, dřevoobráběcím – brusky, frézky),
- Boční odsávací štěrby – používají se nejčastěji v technologii povrchových úprav, u průmyslových van pro čištění, moření či galvanické pokovování strojírenských výrobků.
- Odsávací podlahové rošty, používané v lakovacích a sušících boxech, kabinách apod.
- Jednoduché nebo také tradiční sací nástavce – odsávají škodliviny vznikající na proměnných místech kruhovými, obdélníkovými nebo štěrbinovými odsávacími otvory.

Při navrhování sacích nástavců, jejich umístění v prostoru a volby typu nástavce je nutno dodržet několik hlavních pravidel:

- Sací nástavec musí být umístěn co nejblíže u zdroje, v nejlepším případě zdroj úplně obklopit, aby se předešlo šíření škodlivin do okolí.
- Sací nástavec musí být nastaven tak, aby škodliviny směřovaly do odsávacího otvoru.
- Nástavec nesmí překážet při práci a musí být navržen tak, aby se pracovník nedostal do prostoru mezi zdroj škodlivin a sací nástavec.
- Nástavec musí zaručovat bezpečnost při práci.

Účinnost odsávání škodlivin je možné určit dle (Chyský a Hemzal 1993):

$$\eta = \frac{\dot{m}_{od,\dot{s}}}{\dot{m}_{p\dot{r},\dot{s}}}, \quad (1.16)$$

kde:

$\eta$	[1]	– účinnost odsávání škodlivin,
$\dot{m}_{od,\dot{s}}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	– hmotnostní průtok odsávané škodliviny,
$\dot{m}_{p\dot{r},\dot{s}}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	– hmotnostní průtok generované škodliviny.

Výpočet tradičních sacích nástavců vychází z teorie potenciálního proudění, u kruhového přesněji z teorie bodového propadu. Bodový propad, je definován jako bod v prostoru, do kterého je tekutina kontinuálně rovnoměrně vtahována. Ekvipotenciální plochy (plochy stejných rychlostí), kolmé na proudnici, jsou kulové. Radiální rychlost  $w_r$  do propadu ve vzdálenosti  $r$  od propadu (pro  $r > D$ ), ve sférických souřadnicích je dle (Goodfellow a Tahti 2001):

$$w_r = - \frac{\dot{V}_{od}}{k \cdot \pi \cdot r^2} \quad (1.17)$$

kde:

$w_r$	[m·s <sup>-1</sup> ]	– radiální rychlost do propadu,
-------	----------------------	---------------------------------

$k$	[1]	– konstanta: 2 pro bodový propad v rovině (nekonečný rozměr příruby) 4 pro prostorový propad (bez příruby),
$r$	[m]	– vzdálenost od propadu,
$D$	[m]	– průměr otvoru.

Výpočet šterbinového<sup>6</sup> sacího nástavce vychází z teorie rovinného propadu. Ekvipotenciální plochy jsou válcové. Rychlost proudění  $w_r$  klesá rovnoměrně se vzdáleností od sacího otvoru (pro  $r \geq 2b$ ), dle (Goodfellow a Tahti 2001):

$$w_r = - \frac{\frac{\dot{V}_{od}}{L}}{k \cdot \pi \cdot r} \quad (1.18)$$

kde:

$L$	[m]	– délka šterbiny,
$b$	[m]	– šířka šterbiny,
$k$	[1]	– konstanta: 1 šterbina s přírubou, 2 odsávání z celého prostoru (šterbina bez příruby).

Rychlostní pole obdélníkového sacího nástavce s přírubou musí být v každém směru počítáno zvlášť. Bezrozměrné rychlosti směrem k odsávacímu otvoru je možné určit dle (Goodfellow a Tahti 2001) z rovnic (1.19), (1.20), (1.21):

$$W_x = - \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left( \left[ \sqrt{Z^2 + X_-^2 + Y_+^2} + Y_+ \right] \cdot \left[ \sqrt{Z^2 + X_+^2 + Y_-^2} + Y_- \right] \right) + \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left( \left[ \sqrt{Z^2 + X_+^2 + Y_+^2} + Y_+ \right] \cdot \left[ \sqrt{Z^2 + X_-^2 + Y_-^2} + Y_- \right] \right) \quad (1.19)$$

$$W_y = - \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left( \left[ \sqrt{Z^2 + Y_-^2 + X_+^2} + X_+ \right] \cdot \left[ \sqrt{Z^2 + Y_+^2 + X_-^2} + X_- \right] \right) + \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left( \left[ \sqrt{Z^2 + Y_+^2 + X_+^2} + X_+ \right] \cdot \left[ \sqrt{Z^2 + Y_-^2 + X_-^2} + X_- \right] \right) \quad (1.20)$$

$$W_z = - \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \arctan \frac{X_+ \cdot Y_+}{Z \cdot \sqrt{Z^2 + X_+^2 + Y_+^2}} - \arctan \frac{X_- \cdot Y_+}{Z \cdot \sqrt{Z^2 + X_-^2 + Y_+^2}} - \arctan \frac{X_+ \cdot Y_-}{Z \cdot \sqrt{Z^2 + X_+^2 + Y_-^2}} + \arctan \frac{X_- \cdot Y_-}{Z \cdot \sqrt{Z^2 + X_-^2 + Y_-^2}} \right] \quad (1.21)$$

<sup>6</sup> Dle (ACGIH 2016) je šterbina definována poměrem stran větším než 5.

Bezrozměrná rychlost směrem k odsávacímu otvoru je poté rovna:

$$W = \sqrt{W_x^2 + W_y^2 + W_z^2} \quad (1.22)$$

kde:

$$\begin{aligned} X_+ &= X + 0,5 \cdot \sqrt{\frac{b}{L}} & X_- &= X - 0,5 \cdot \sqrt{\frac{b}{L}} \\ Y_+ &= Y + 0,5 \cdot \sqrt{\frac{b}{L}} & Y_- &= Y - 0,5 \cdot \sqrt{\frac{b}{L}} \end{aligned} \quad (1.23)$$

$W_x$	[1]	– bezrozměrná rychlost kolmá na rovinu odsávacího otvoru
$W_y$	[1]	– bezrozměrná rychlost rovnoběžná s rovinou odsávacího otvoru,
$W_z$	[1]	– bezrozměrná rychlost rovnoběžná s rovinou odsávacího otvoru,
$X$	[1]	– bezrozměrná vzdálenost podél osy $x$ (poměr vzdálenosti v ose $x$ a druhé odmocniny z plochy odsávacího otvoru),
$Y$	[1]	– bezrozměrná vzdálenost podél osy $y$ (poměr vzdálenosti v ose $y$ a druhé odmocniny z plochy odsávacího otvoru),
$Z$	[1]	– bezrozměrná vzdálenost podél osy $z$ (poměr vzdálenosti v ose $z$ a druhé odmocniny z plochy odsávacího otvoru).

Pro šterbinový odsávací nástavec s přírubou lze pokles rychlosti v ose před nástavcem stanovit dle (Burgess et al. 2004) z rovnice (1.24):

$$\frac{w_x}{w_{od}} = 0,36 \cdot \left(\frac{x}{b}\right)^{-1} \quad (1.24)$$

kde:

$$w_{od} = \frac{\dot{V}_{od}}{L \cdot b} \quad (1.25)$$

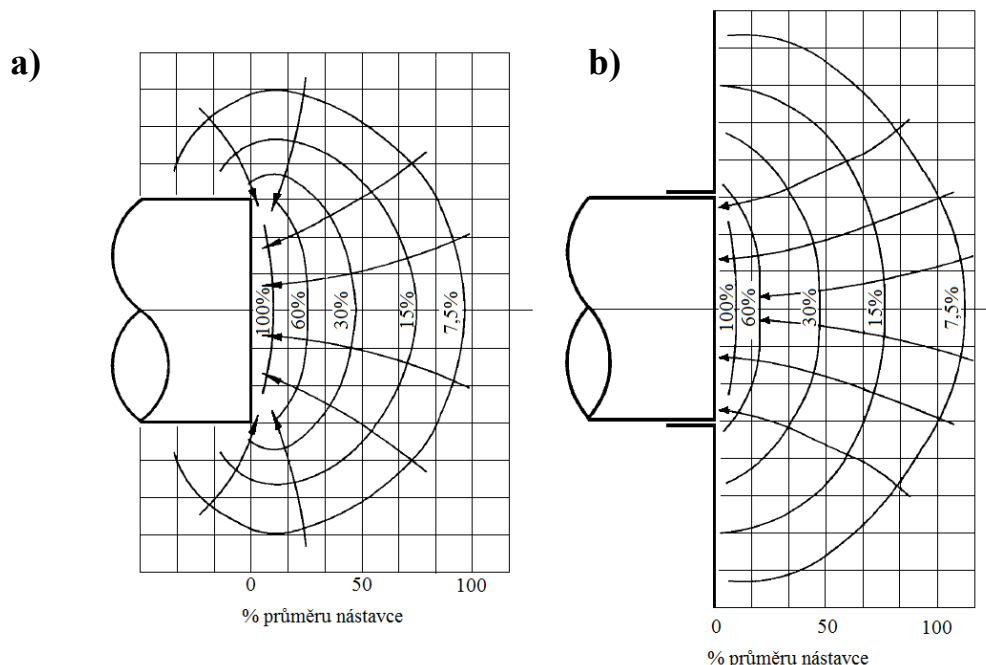
$w_x$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	– osová rychlost ve vzdálenosti $x$ od příruby sacího nástavce,
$w_{od}$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	– rychlost odsávaného vzduchu ve vstupním průřezu,
$x$	$[\text{m}]$	– vzdálenost od příruby sacího nástavce.

Velkou nevýhodou sacích nástavců je, že rychlost vzduchu před sacím nástavcem se zvětšující se vzdáleností rychle klesá. Z toho důvodu je nutné umístit vyústění nástavce co nejblíže ke zdroji znečištění. Při návrhu sacího nástavce by měla být také zajištěna dostatečná rychlost odsávaného proudu vzduchu blízko zdroje škodlivin, která musí být větší než rychlost šířící se škodliviny. Minimální doporučené zachytné rychlosti pro dosažení dostatečné účinnosti zachycení škodlivin uvádí tab. 1.1. Stejně tak objemový průtok nasávaného vzduchu musí být větší než objemový průtok generovaný zdrojem škodlivin. Proud vzduchu by měl být usměrněn do sacího nástavce.

Tab. 1.1 – Minimální doporučené zachytné rychlosti pro dosažení dostatečné účinnosti zachycení škodlivin (ACGIH 2016)

Podmínky šíření škodliviny	Příklad procesu	Potřebná zachytná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
Uvolňování s prakticky nulovou rychlostí do klidného vzduchu	Odpařování z otevřených nádob	0,25 – 0,5
Uvolňování nízkou rychlostí do částečně klidného vzduchu	Kabiny pro stříkání nátěrových hmot, svařování, pokovování	0,5 – 1,0
Uvolňování větší rychlostí nebo do oblasti rychlého pohybu vzduchu	Otevřené kabiny pro stříkání nátěrových hmot, plnění sudů	1,0 – 2,5
Uvolňování vysokou počáteční rychlostí do oblasti velmi rychlého pohybu vzduchu	Broušení, tryskání, obrábění kamene	2,5 – 10

Při použití tradičního sacího nástavce dochází k přisávání neznečištěného vzduchu za sacím nástavcem (obr. 1.5a, obr. 1.6a) a tím se snižuje koncentrace škodlivin v odsávaném vzduchu a dosah odsávání. Tento jev je možné omezit, nebo úplně eliminovat použitím dostatečně velké příruby kolem sacího nástavce, příruba také snižuje tlakové ztráty na vstupu do odsávacího otvoru (ACGIH 2016; DallaValle 1944; Fletcher 1977; Fletcher 1978) viz obr. 1.5b, obr. 1.6b a obr. 1.7a. Avšak dle rovnice (1.17) resp. (1.18) je pokles rychlosti proudu odsávaného vzduchu, úměrný čtverci vzdálenosti resp. šířce štěrbin a vzdálenosti od výustky, a v obou případech se téměř neliší. Možnou alternativou je využití zesíleného odsávacího systému.

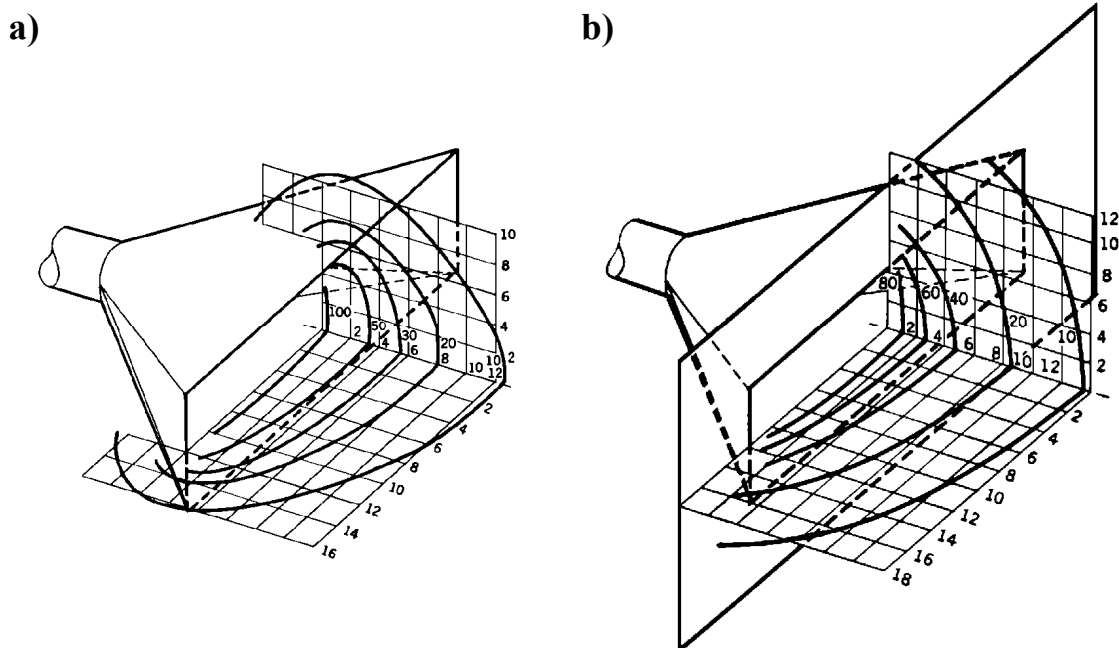


Obr. 1.5 – Proudové pole (ekvipotenciální plochy jsou v procentech rychlosti v otvoru):

a) tradičního kruhového sacího nástavce (ACGIH 2016)

b) kruhového sacího nástavce s přírubou (ACGIH 2016)

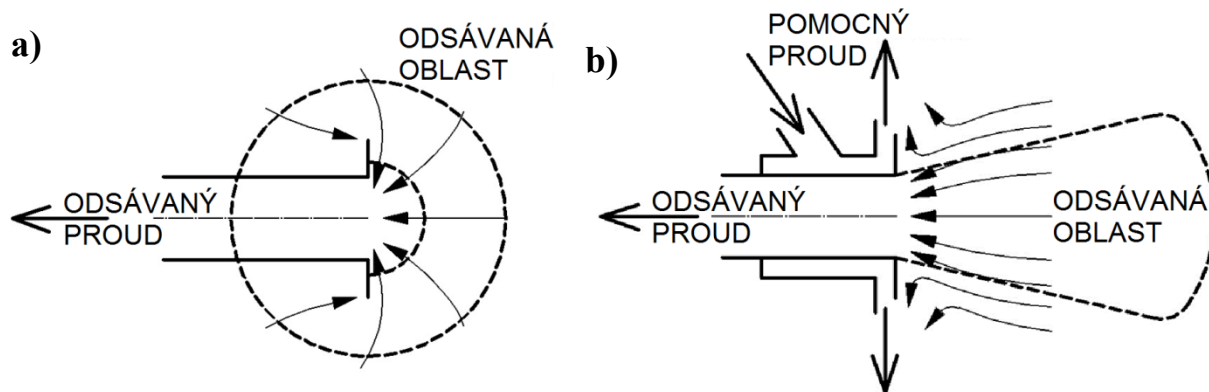




Obr. 1.6 – Proudové pole (ekvipotenciální plochy jsou v procentech rychlosti v otvoru):

- a)** tradičního obdélníkového sacího nástavce (DallaValle 1944)  
**b)** obdélníkového sacího nástavce s přírubou (DallaValle 1944)

Zesílený odsávací systém také známý jako REEXS<sup>7</sup> využívá zesílený sací nástavec nazýván také jako Aabergův sací nástavec (Aaberg 1968). Jde o tradiční sací nástavec, který je vybaven jednou nebo více štěrbinami pro přívod vzduchu. Tento přiváděný proud vzduchu vytváří imaginární přírubu, která vymezuje odsávaný prostor. Navíc přiváděný proud s sebou strhává okolní vzduch a tím ještě umocňuje proudění před nástavcem směrem k odsávacímu otvoru. Poté vhodným nastavením poměru hybnostních toků přiváděného a odsávaného vzduchu je možné částečně změnit oblast účinného odsávání a tím dosáhnout lepších výsledků odsávání viz obr. 1.7b.



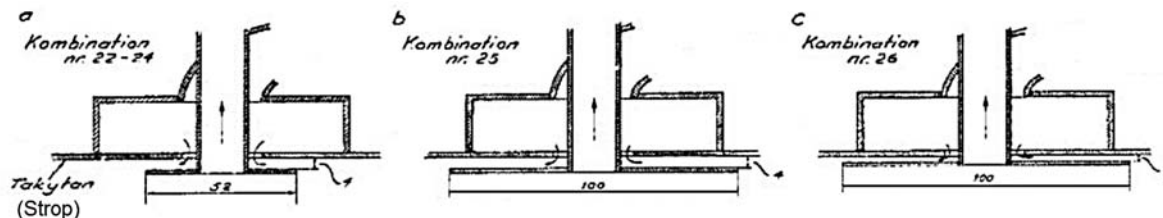
Obr. 1.7 – Zobrazení proudnic (Krejčí 2006) před:

- a)** tradičním sacím nástavcem  
**b)** zesíleným sacím nástavcem

<sup>7</sup> REinforced EXhaust System (Aaberg 1968)

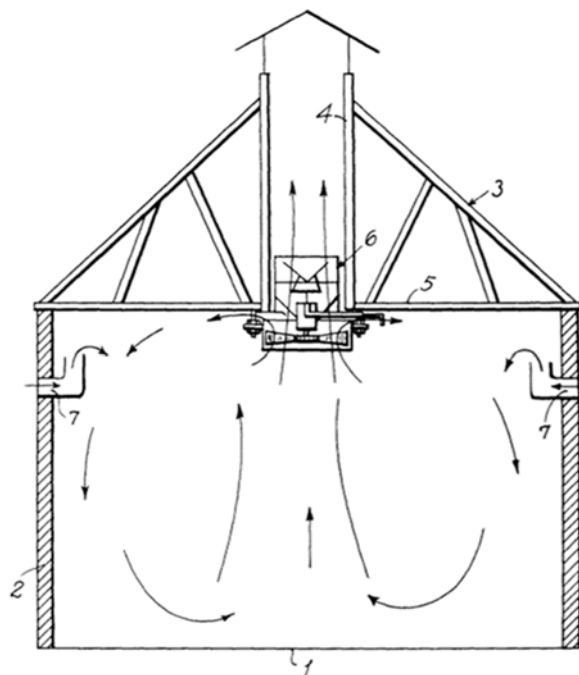
## 2 ZESÍLENÝ ODSÁVACÍ SYSTÉM

V roce 1947 švédský profesor Rydberg prováděl výzkum různých variant uspořádání přívodu a odvodu vzduchu na účinnost odsávání. Při experimentech byly použity modely pracující s vodou, jejichž původní náčrtý jsou uvedeny na obr. 2.1. Modely byly připevněné ke stropu a umožňovaly změnu průměru příruby a šířky přívodní štěrbiny. Rydberg po zveřejnění tohoto článku tuto problematiku již více nepublikoval (Rydberg a Kulmar 1947).

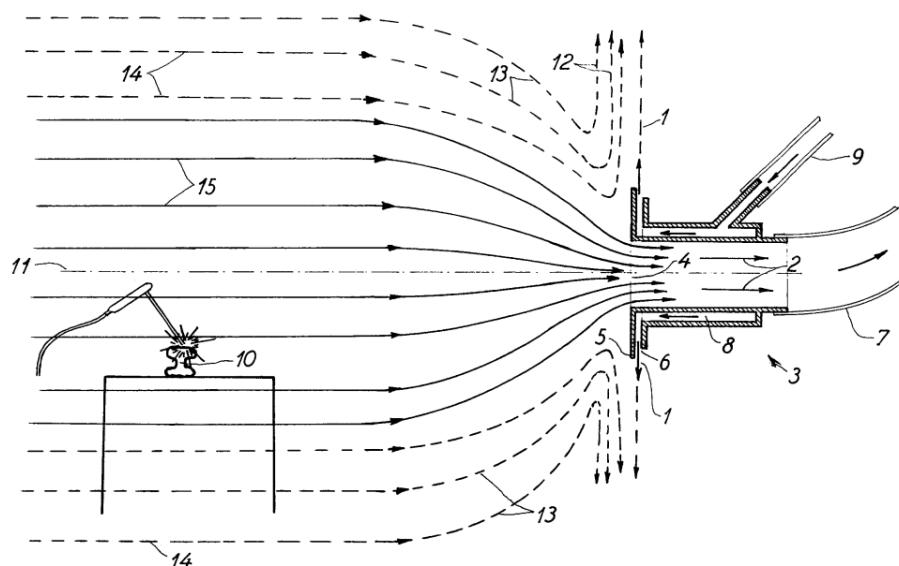


Obr. 2.1 – Původní náčrt zařízení zkoumaného  
prof. Rydbergem v roce 1947 (Rydberg a Kulmar 1947)

Vynález zesíleného odsávacího systému je ale připisován dánskému vědci C. P. Aabergovi, který v roce 1966 podal patent na zařízení určené pro celkové větrání místností (především stájí) uvedené na obr. 2.2, které pracuje na podobném principu jako REEXS (Aaberg 1968). Zařízení využívalo jeden ventilátor pro odsávání, kdy část proudu byla recirkulována radiálními štěrbinami zpět do místnosti. V jednom z návrhů bylo tohoto radiálního proudu také využito pro přísávání čerstvého vzduchu z vnějšího prostředí. Poté v roce 1975 podal další žádost o patent na zařízení pro lokální větrání (obr. 2.3) pracující na stejném principu jako dnešní REEXS (Aaberg 1977).



Obr. 2.2 – Původní náčrt zařízení patentovaného  
C. P. Aabergem v roce 1968 (Aaberg 1968)



Obr. 2.3 – Původní náčrt zařízení patentovaného  
C. P. Aabergem v roce 1977 (Aaberg 1977)

První vědecké publikace zesíleného odsávacího systému byly publikovány francouzskými vědci Quintotem v roce 1977 (Quintot et al. 1977), Thiebaudem v roce 1983 (Thiebaut et al. 1983) a Braconnierem v roce 1986 (Braconnier et al. 1986), kteří měřili účinnost zachycení štěrbinového zesíleného odsávacího systému a ukázali, že došlo ke zvýšení odsávací rychlosti v oblasti před sacím nástavcem oproti tradičnímu odsávacímu systému.

Obsáhlejší výzkum byl následně prováděn na dánské univerzitě v Aalborgu profesory Hyldgardem a Høgstedem.

Z Hyldgardových experimentů (Hyldgard 1987) plyne, že pro daný tvar nástavce, přiváděcí štěrby a množství odsávaného vzduchu musí být pro vytvoření zesíleného odsávání překonána tzv. kritická rychlost přiváděného proudu. Kritickou rychlost definoval jako minimální výtokovou rychlost, která je nezbytná pro překonání sacího efektu, aby nedošlo k vtažení přiváděného proudu do odsávacího otvoru a vzniku tzv. hydraulického zkratu. Kritická rychlost se také vyznačuje hysterezí. Jestliže je vytvořeno vhodné proudové pole, při poklesu výtokové rychlosti přivodního proudu na hodnotu  $w_0 = w_1$  se toto pole náhle změní a při dalším poklesu se postupně přibližuje proudovému poli tradičního odsávacího systému. Naopak při nárůstu výtokové rychlosti přivodního proudu dojde k vytvoření požadovaného proudového pole až při rychlosti  $w_0 = w_2 > w_1$ . Za kritickou rychlost se poté považuje rychlost  $w_0 = w_2$ . V případě rychlosti přiváděného proudu nižší, než kritické dochází k vtažení přiváděného proudu do odsávacího otvoru a vzniku hydraulického zkratu, jehož výsledkem je nižší účinnost než u tradičního odsávání.

Původní experimenty Hyldgarda byly prováděny na zesíleném sacím nástavci, který byl opatřen velmi úzkou štěrbinou o šířce  $b = 0,15$  mm, jejíž použití vyžadovalo velmi vysoké rychlosti přivodního proudu ( $w_0 = 30\text{--}50$  m.s<sup>-1</sup>). Brzy se však ukázalo, že tak vysoké rychlosti nejsou vhodné, z důvodu vysokého hluku a velké tlakové ztráty.

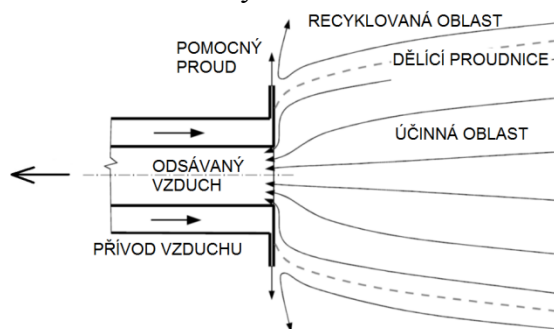
Hyldgard dále zjistil, že kritická rychlost je přímo úměrná odsávanému hmotnostnímu toku a že pro daný sací nástavec může být snížena zvětšením šířky štěrby. Dále pak definoval pracovní parametr  $I$  jako poměr hybnostních toků přiváděného a odsávaného vzduchu:

$$I = \frac{\dot{m}_{př} \cdot w_{př}}{\dot{m}_{od} \cdot w_{od}}, \quad (2.1)$$

kde:

$I$	[1]	– pracovní parametr,
$\dot{m}_{př}$	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	– hmotnostní průtok přiváděného vzduchu,
$\dot{m}_{od}$	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	– hmotnostní průtok odsávaného vzduchu,
$w_{př}$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	– rychlost proudění vzduchu z přiváděcí štěrby,
$w_{od}$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	– rychlost odsávaného vzduchu ve vstupním průřezu.

Profesor Høgsted se zabýval experimentálním výzkumem vertikálně zavěšeného kruhového zesíleného sacího nástavce (Høgsted 1987). Výzkum ukázal, že ne všechny vzduch pohybuje se k sacímu otvoru je jím skutečně odveden, ale že část tohoto vzduchu je unášena od sacího otvoru radiálně přiváděným vzduchem. Během pokusů s kouřem zjistil, že pokud se kouř uvolňuje blízko osy nástavce tak je úplně všechny odváděn sacím otvorem, ale jestliže se uvolňuje v určité vzdálenosti od osy nástavce tak je zachycen radiálně přiváděným proudem a unášen zpět do pracovního prostředí. Høgsted tedy rozdělil oblast před sacím nástavcem na dvě oblasti – účinnou oblast a recyklovanou oblast (obr. 2.4). Poté předpokládal účinnost odsávání v účinné oblasti 100 % a 0 % v recyklované oblasti.



Obr. 2.4 – Rozdělení oblastí před zesíleným sacím nástavcem dle Høgsteda

Výzkum Pedersena (Pedersen 1991) společný s Nielsenem (Pedersen a Nielsen 1991) dokazoval funkčnost a potenciál zesíleného kruhového sacího nástavce. Ve své práci popsali závislost účinnosti odsávání na pracovním parametru  $I$  viz rovnice (2.1). Dále dokázali, že zachytná rychlost definovaná Hyldgardem (Hyldgard 1987) taktéž závisí na pracovním parametru  $I$ . Zjistili také, že nejnižší hodnota pracovního parametru  $I$  pro zesílené odsávání je  $I = 0,1$ .

Dále se věnovali stanovení osově rychlosti  $w_x$  pro tři různé typy zesílených odsávacích systémů. Jednalo se o osově-symetrický proud, trojrozměrný proud a trojrozměrný proud se zadní stěnou (obr. 2.5).

Na základě provedených měření popsali pokles osově rychlosti v závislosti na vzdálenosti od příruby sacího nástavce  $x$  pomocí empirického vztahu (Pedersen a Nielsen 1991):

$$\frac{w_x}{w_{od}} = k \cdot \left(\frac{x}{d}\right)^{-n}, \quad (2.2)$$

kde:

$w_x$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	– osová rychlost ve vzdálenosti $x$ od příruby sacího nástavce,
$k$	[1]	– konstanta,
$x$	[m]	– vzdálenost od příruby sacího nástavce,
$d$	[m]	– průměr odsávacího otvoru,
$n$	[1]	– exponent uvedený v obr. 2.5.

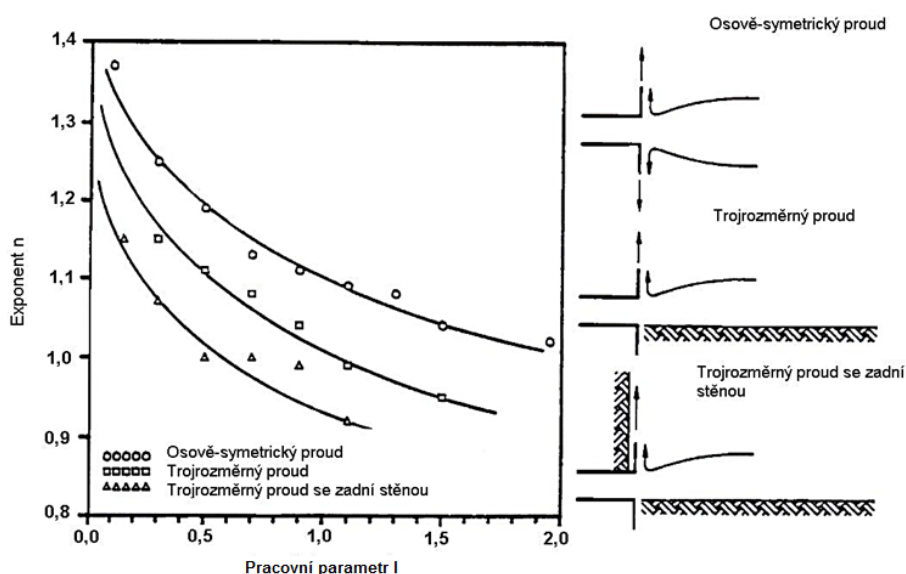
Dále z měřených hodnot stanovili závislost mezi poměry hybnostních toků pro tři různé typy proudů:

$$I_{os} = 0,5 \cdot I_{3D} = 0,2 \cdot I_{3D+stěna}, \quad (2.3)$$

kde:

- |                |     |   |   |
|----------------|-----|---|---|
| $I_{os}$       | [1] | – | pracovní parametr pro osově symetrický proud,             |
| $I_{3D}$       | [1] | – | pracovní parametr pro trojrozměrný proud,                 |
| $I_{3D+stěna}$ | [1] | – | pracovní parametr pro trojrozměrný proud se zadní stěnou. |

V závěru práce se Pedersen a Nielsen zabývali měřením účinnosti odsávání metodou stopového plynu a jako stopový plyn použili SF<sub>6</sub> (fluorid sírový). Výsledky jejich měření však nesouhlasí s teoretickou účinností odsávání v účinné oblasti navrženou Høgstodem (Høgsted 1987). Zjistili totiž, že účinnost odsávání v účinné oblasti klesá s rostoucí vzdáleností od osy sacího nástavce, a tudíž neexistuje skoková změna účinnosti ze 100 % na 0 % na ploše oddělující účinnou a recyklovanou oblast.



Obr. 2.5 – Závislost exponentu  $n$  na velikosti okamžitého pracovního parametru  $I$  pro zesílený odsávací systém s průměrem odsávacího otvoru  $d = 103 \text{ mm}$  (Pedersen a Nielsen 1991)

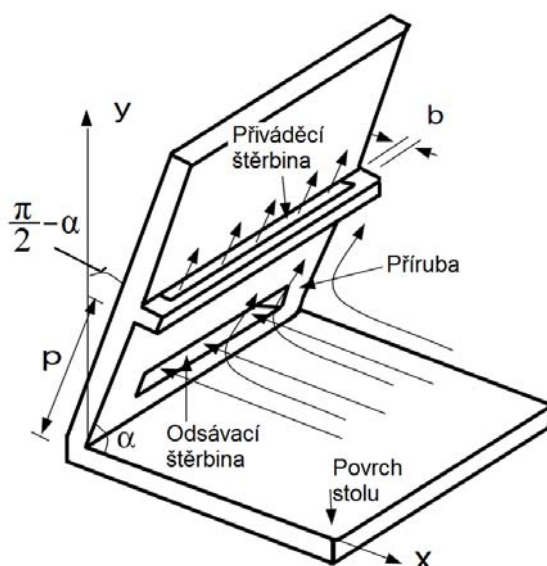
Saunders a Fletcher (Saunders a Fletcher 1993) měřením dokázali, že Aabergův sací nástavec má schopnost ovlivnit proudění před nástavcem až do vzdálenosti  $9 \times d$ , což je ve shodě s výsledky  $10 \times d$  publikovanými Høgstodem (Høgsted 1987). Uvedli, že obrazy proudění před sacím nástavcem jsou ovlivněny především přiváděným proudem vzduchu a že izočáry konstantní účinnosti zachycení škodlivin odpovídají izotachám – čárám konstantní rychlosti, pokud není rozdíl v hustotách škodliviny a okolního vzduchu. Z výsledků dále plyne, že účinnost zachycení v účinné oblasti se při zvětšování vzdálenosti od příruby snižuje ze 100 % ve vzdálenosti  $4 \times d$  na 50 % ve vzdálenosti  $9 \times d$ , což je v rozporu s výsledky publikovanými Høgstodem (Høgsted 1987), který v celé oblasti předpověděl 100% účinnost. Výsledky Saunderse a Fletchera se shodují také s dřívějšími pozorováními Pedersena a Nielsena (Pedersen a Nielsen 1991).

Ve svých publikacích (Hunt 1994; Hunt a Ingham 1992; Hunt a Ingham 1996) se Hunt věnoval problematice REEXSu především teoreticky s využitím počítačového modelování a své výsledky pak porovnával s dříve naměřenými hodnotami. Vyvinul vlastní matematický model proudění zesíleného sacího nástavce, pro předpovězení rychlostí proudění v oblasti před sacím nástavcem. Vyvinul dva modely – jeden pro osově symetrický zesílený sací nástavec, a druhý pro zesílený šterbinový sací nástavec. Ve svém modelu rozdělil celkový

proud vytvářený sacím a ejekčním účinkem sacího nástavce na tři dílčí proudy: proud v oblasti radiálního proudu, proud unášený radiálním proudem a odsávaný proud. Výsledky matematického modelu měly velmi dobrou shodu s výsledky dříve experimentálně získanými Hyldgardem (Hyldgard 1987), Høgstedem (Høgsted 1987), Pedersenem a Nielsenem (Pedersen a Nielsen 1991) a také Saundersem a Fletcherem (Saunders a Fletcher 1993). Výborná shoda byla také mezi matematickým modelem a komerčně dostupným CFD programem Fluent (Hunt 1994), který řeší plně turbulentní Navier – Stokesovy rovnice. Vzhledem k výborným výsledkům dosaženým s tímto modelem Hunt doporučuje využívat jej pro další optimalizaci parametrů zesíleného sacího nástavce. Experimentální výzkum REEXS je totiž jak finančně, tak časově velmi náročný vzhledem k poměrně dosti velkému počtu parametrů, které ovlivňují jeho správnou činnost. Pomocí počítačového modelování je možné parametry optimalizovat v poměrně krátkém časovém intervalu a bez značných finančních nákladů a teprve poté přistoupit k experimentu a ověřit správnost již předpovězených výsledků.

Numerickému modelování a měření zesíleného štěrbinového sacího nástavce se stolem se následně věnoval Kulmala (Kulmala 1998). Z měření účinnosti zachycení škodlivin vyvodil závěr, že kontury plochy 50% účinnosti zachycení škodlivin odpovídají dělicí proudnici rozdělující účinnou a recyklovanou oblast. Dále zkoumal hysterezní chování přívodního proudu při vzniku hydraulického zkratu. Zjistil, že je potřeba větší průtok přiváděného proudu pro překonání jevu hydraulického zkratu v případě, že bylo v provozu nejdříve odsávání v porovnání s případem, kdy byl v provozu nejdříve přívodní proud, což je ve shodě s experimenty Hyldgarda (Hyldgard 1987). Množství přiváděného proudu vzduchu bylo poté postupně snižováno na stejný tzv. „provozní parametr“ zohledňující na rozdíl od pracovního parametru  $I$  také rozměry nástavce (průtok odsávaného vzduchu byl vždy konstantní). Z vyhodnocení plyne, že horní i dolní „provozní parametr“ je spojený s hysterezním chováním systému a byl téměř konstantní pro různé průtoky odsávaného vzduchu.

Pánové Wen a Ingram navrhli nový matematický model (Wen a Ingham 2000) pro výpočty zesíleného štěrbinového sacího nástavce se stolem. Výsledky svého modelu porovnávali se CFD s dobrou shodou.



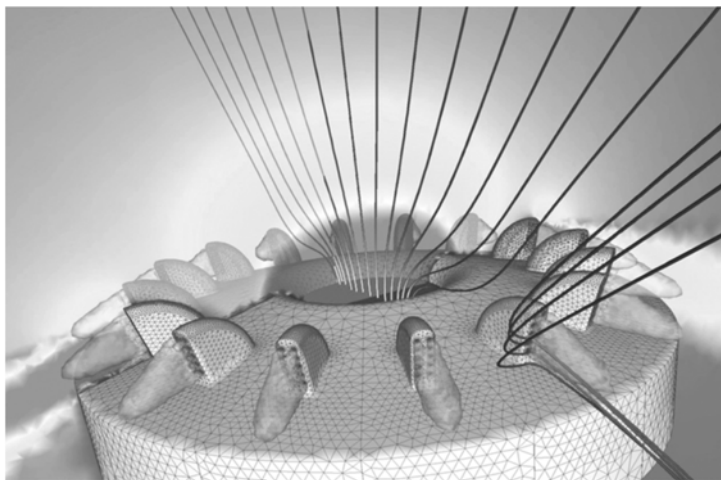
Obr. 2.6 – Schéma Aabergova štěrbinového sacího nástavce se skloněným přívodem (Wen, Hunt a Ingham 2000)



V dalších výzkumech (Hunt et al. 2000; Wen et al. 2000; Wen et al. 2002) upravili svůj numerický model pro vyhodnocení vlivu směru (úhlu) přívodního proudu (obr. 2.6) na proudění před sacím nástavcem. Z výsledků plyne, že zvýšením průtoku přívodního proudu nebo zmenšením úhlu  $\alpha$  mezi přívodní štěrbinou a stolem je možné zvýšit rychlost před sacím nástavcem ve směru k odsávacímu otvoru. Zmenšením úhlu  $\alpha$  lze také zvýšit energetickou efektivitu sacího nástavce (není potřeba takový přívodní proud).

Nejobsáhlejší výzkum Aabergova sacího nástavce uvádí ve svých publikacích Gubler (Gubler 2002; Gubler a Moser 2000a; Gubler et al. 2002), který provedl první praktickou aplikaci vlastního návrhu kruhového zesíleného odsávacího systému ve svařovně (Gubler et al. 2003; Rueegg et al. 2004). Ve své práci provedl základní vyhodnocení vlivu provozních parametrů (směrování přívodního proudu, velikost odsávacího otvoru, typ přívodní štěrbin) a navrhl nový typ sacího nástavce. Jeho návrh využívá oddělených trysek pro přívodní proud místo jedné celistvé přívodní štěrbiny (obr. 2.7), což mělo zvýšit třecí plochu přiváděného proudu, a tak zvýšit sací účinek. Provedl mnoho CFD simulací pro návrh vhodných geometrických parametrů nového nástavce. Dále pomocí CFD a experimentálního výzkumu vyhodnotil účinnost zachycení škodlivin v případě výskytu příčného proudu. Prokázal vyšší účinnost Aabergova sacího nástavce v porovnání s tradičním sacím nástavcem bez příruby a s přírubou. Zkoumal také vliv odsávací rychlosti na účinnost zachycení škodlivin. Maximální účinnosti zachycení škodlivin bylo dosaženo při rychlosti v odsávacím otvoru  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Další zvyšování rychlosti snižovalo zlepšené odsávání způsobené přiváděným proudem. Při rychlosti  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  byla již účinnost tradičního nástavce shodná s Aabergovým sacím nástavcem. Při dalším zvýšení rychlosti je již účinnost Aabergova sacího nástavce horší oproti tradičnímu. Gubler prováděl také experimenty s přiváděným stopovým plynem ( $\text{N}_2\text{O}$ ) o dvou různých teplotách (40 K a 60 K nad teplotou okolí). Tyto experimenty prováděl při výzkumu příčného proudění ale pouze s tradičním sacím nástavcem.

Gubler se dále pomocí počítačového modelování proudění věnoval vlivu úhlu mezi přívodním a odsávaným proudem kruhového zesíleného sacího nástavce (Gubler a Moser 2000b). Úhel mezi proudy měnil v rozmezí  $-15^\circ$  až  $+20^\circ$ . Při sklonu přiváděného proudu mezi  $-15^\circ$  a  $+10^\circ$  se rychlost proudění ve směru osy měnila minimálně. Při sklonu proudu o  $+10^\circ$  došlo k ohnutí přívodního proudu k odsávanému proudu. Kritická hodnota sklonu přívodního proudu byla určena na  $+20^\circ$ . Těsně pod kritickou hodnotou bylo dosahováno největších odsávacích rychlostí. Při zvětšování sklonu přívodního proudu významně narůstá dosah účinné oblasti, ale dalším zvětšováním sklonu proudu nad kritický úhel dochází ke kolapsu.



Obr. 2.7 – Výsledek Gublerové optimalizace designu zesíleného kruhového sacího nástavce  
(Gubler, Moser, Sprecher a Rueegg 2002)

Ve stejném období na Energetickém ústavu, Fakultě strojního inženýrství, Vysokého učení technického v Brně započal výzkum osově symetrického zesíleného sacího nástavce také Patočka s doc. Janotkovou (Patočka 2002; Patočka a Janotková 2000; Patočka a Janotková 2002). Svůj výzkum prováděl metodou stopového plynu se dvěma plyny:  $\text{CO}_2$  a  $\text{SF}_6$ . Zkoumal vliv různé šířky přívodní štěrbin (2 mm, 4 mm a 8 mm) při konstantním pracovním parametru  $I$ . Dále měřil tlakové ztráty sacího nástavce a vytvořil jednoduchý 2D model v kódu PHOENICS. Ve své práci uvádí funkční závislosti popisující pokles účinnosti odsávání v ose sacího nástavce v závislosti na vzdálenosti od příruby pro různé stavy proměřovaných systémů a také rovnice, jež popisují ideální polohu zdroje škodlivin vzhledem k ústí sacího nástavce v závislosti na hodnotě pracovního parametru  $I$ .

Současně se Krejčí začal věnoval numerickému modelování Aabergova sacího nástavce. Ve svých publikacích (Krejčí a Jícha 2001a; Krejčí a Jícha 2001b; Krejčí a Jícha 2001c; Krejčí a Jícha 2002b) se věnoval numerickým simulacím vlivu šířky přívodní štěrbin a průměru příruby s přívodní štěrbinou, kdy se zvětšováním průměru příruby docházelo ke zkracování zachytné vzdálenosti. Naopak při zmenšování příruby se zvětšovalo riziko hydraulického zkratu.

Ve spolupráci s Patočkou (Krejčí et al. 2002) také provedl porovnání numerické simulace účinnosti odsávání s měřením pomocí stopového plynu ( $\text{CO}_2$ ), kdy výsledky simulace a měření byly v dobré shodě, pouze pro větší pracovní parametr  $I$  (poměr hybnostních toků přiváděného a odsávaného vzduchu) byly vidět jisté rozdíly způsobené unášením stopového plynu přívodním proudem a chybějící fyzickou přítomností zdroje stopového plynu v simulaci.

Krejčí byl také vedoucím diplomové práce Kratochvíla (Kratochvíla 2002), který se věnoval měření rozložení rychlostí a turbulencí před kruhovým Aabergovým sacím nástavcem. Následně také provedl porovnání numerické simulace rychlostního pole s měřením pomocí šesti termo-anemometrických sond pro různá nastavení pracovního parametru  $I$  (Krejčí a Jícha 2002a). Rychlosti získané numerickou simulací byly v dobré shodě s naměřenými hodnotami.

V pracích (Košner a Krejčí 2005; Krejčí 2006; Krejčí et al. 2004; Krejčí et al. 2005; Krejčí et al. 2006b) se dále věnoval numerickým simulacím proudu vystupujícího z přívodní štěrbin osově symetrického zesíleného sacího nástavce. Tyto simulace poté verifikoval měřením. Následně prováděl simulace kombinace odsávání a přívodu vzduchu (REEXS), které dále porovnával s měřením. V simulacích zkoumal vliv pracovního parametru  $I$ , průměru příruby s přívodní štěrbinou, šířky přiváděcí štěrbin a velikosti odsávacího otvoru. Vyvodil závěr, že při vhodném návrhu průměru příruby s přívodní štěrbinou je možné značně omezit vznik hydraulického zkratu. Zabýval se také vlivem polohy sacího nástavce vůči stolu (Krejčí et al. 2006a), kdy sací nástavec byl zavěšený nad stolem. Bylo zjištěno zhoršení účinnosti při zmenšení vzdálenosti nástavce od stolu a současném použití stolu větších rozměrů. V tomto případě došlo k nestabilnímu přilnutí přiváděného proudu vlivem Coandova efektu ke stolu. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při větším sklonu nástavce od svislé osy ( $30^\circ$ ).

V pracích Košnera a Krejčího (Košner a Krejčí 2006; Krejčí a Košner 2006; Krejčí a Košner 2007; Krejčí a Košner 2008b; Krejčí et al. 2006c; Krejčí et al. 2006d) byl dále experimentálně a pomocí numerických simulací (s různými modely turbulence) zkoumán vliv šířky přívodní štěrbin na radiální proud Aabergova sacího nástavce – pokles osově rychlosti, úhel rozšíření, tvar rychlostního profilu (který byl také porovnán se vztahy dostupnými v literatuře), symetrii radiálního proudu a také profil rychlosti v axiálně vyvolaném sekundárním proudění. Z výsledků bylo patrné, že zvětšováním šířky přívodní štěrbin se zvětšovalo přisávání, tento efekt však nerostl lineárně s šířkou štěrbin. Dále ukázali, že s rostoucí intenzitou turbulence v přívodní štěrbině došlo ke zvětšení přisávání o 8 % při nárůstu intenzity turbulence z 5 % na 40 %.



Následně se ve svých pracích (Krejčí a Košner 2008a; Krejčí a Košner 2009; Krejčí a Košner 2011) věnovali také energetické náročnosti Aabergova sacího nástavce v porovnání s tradičním sacím nástavcem. Ukázali, že použití Aabergova nástavce může být ekonomicky výhodnější, je ale třeba přihlédnout k nutnosti použití dvou ventilátorů a vzduchovodů, čímž se zvyšuje jeho investiční náročnost.

Během prací Krejčího na osově symetrickém zesíleném sacím nástavci, navrhl a zrealizoval Malásek ve své diplomové práci (Malásek 2003) zesílený štěrbinový sací nástavec. Následně model tohoto nástavce využil Krajča (Krajča a Janotková 2003) ve své numerické simulaci. Kdy simuloval nástavec v režimu tradičního odsávání a odsávání s pracovním parametrem  $I = 0,6$ . Výsledky ukazují, že v klidném okolním prostředí i při příčném, parazitním proudění je zesílený odsávací nástavec účinnější.

Zesílený štěrbinový sací nástavec využil Mašek ve své diplomové práci (Mašek 2004) pro určení vlivu hustoty škodliviny na účinnost odsávání tohoto sacího nástavce. K tomuto účelu posloužily dva stopové plyny  $\text{CO}_2$  a  $\text{SF}_6$ . Ve výsledcích měření je v horizontální rovině značná asymetrie vzhledem k horizontální rovině sacího nástavce, kdy i ve větší vzdálenosti nad osou sacího nástavce je velká účinnost odsávání. U  $\text{SF}_6$  je díky jeho větší hustotě tato asymetrie ještě větší ve srovnání s  $\text{CO}_2$ .

Janotková a Malásek se následně ve svých publikacích (Janotková et al. 2004a; Janotková et al. 2004b; Malásek a Janotková 2004; Malásek a Janotková 2005) věnovali měření účinnosti odsávání zesíleného štěrbinového sacího nástavce a vlivu zakončení přívodu stopového plynu pro měření účinnosti odsávání. Také zde prezentují vizualizaci účinnosti odsávání, tvar přívodního proudu a vznik hydraulického zkratu pomocí kouřové metody. Z výsledků je patrné, že s rostoucí hodnotou pracovního parametru dochází k prodlužování účinné oblasti a současně k jejímu zužování.

Janeček se ve své diplomové práci (Janeček 2005) věnoval vlivu odsávaného množství vzduchu na účinnost odsávání zesíleného štěrbinového sacího nástavce. Porovnání provedl pro rychlost proudění v odsávací štěrbině 8 a 12  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  a pracovní parametry  $I = 0; 0,3; 0,6$  a 0,9. Při vzrůstající rychlosti v odsávací štěrbině se účinná oblast odsávání rozšiřuje a prodlužuje až na trojnásobek.

Souběžně s Janečkem pracoval Novák na své diplomové práci (Novák 2005), ve které proměřil proudové pole a pole turbulencí zesíleného štěrbinového sacího nástavce při rychlosti v odsávací štěrbině 8  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Dále odvodil vztahy pro výpočet poměrné osově rychlosti pro pracovní parametr  $I = 0; 0,3; 0,6$  a 0,9.

Následující rok prováděl Hušák ve své diplomové práci (Hušák 2006) výzkum účinnosti zesíleného štěrbinového sacího nástavce s pracovním stolem při rychlosti v odsávací štěrbině 8  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Při zesíleném odsávání bylo před sacím nástavcem dosaženo vyšší účinnosti oproti tradičnímu odsávání. Při zvyšování pracovního parametru  $I$  se prodlužovala oblast účinného odsávání např. oblast s 90% účinností je při pracovním parametru  $I = 0,9$  téměř dvojnásobná oproti nastavení  $I = 0,6$ .

Souběžně s Hušákem proměřoval Molin ve své diplomové práci (Molin 2006) proudové pole a pole turbulencí zesíleného štěrbinového sacího nástavce při rychlosti v odsávací štěrbině 12  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Dále odvodil vztahy pro výpočet poměrné osově rychlosti pro pracovní parametr  $I = 0; 0,3; 0,6$  a 0,9.

Následně Malásek a Janotková ve své publikaci (Malásek a Janotková 2006) provedli porovnání účinnosti odsávání osově symetrického zesíleného sacího nástavce a zesíleného štěrbinového sacího nástavce. Osově symetrický zesílený sací nástavec měl podstatně větší a delší oblast účinného odsávání. V publikaci (Janotková et al. 2008) zkoumali proudové pole a energetickou náročnost zesíleného štěrbinového sacího nástavce. Zesílený sací nástavec dosahoval ve stejné vzdálenosti od příruby vyšších rychlostí než tradiční sací nástavec. Použití zesíleného sacího nástavce také přineslo energetické úspory 50 až 70 %.

Další prací zkoumající účinnost zesíleného štěrbinového sacího nástavce s pracovním stolem ale tentokrát při rychlosti v odsávací štěrbině  $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  byla diplomová práce Pavlase (Pavlas 2009). Při zesíleném odsávání bylo před sacím nástavcem dosaženo vyšší účinnosti oproti tradičnímu odsávání. Při zvyšování pracovního parametru do hodnoty  $I = 0,6$  se oblast účinného odsávání prodlužovala, avšak při pracovním parametru  $I = 0,9$  došlo ke zkrácení účinné oblasti. Při porovnání s výsledky Hušáka (Hušák 2006) jsou ale plochy účinného odsávání kratší.

Winkler (Winkler 2012) proměřoval účinnost zesíleného štěrbinového sacího nástavce v kombinaci s pracovním stolem v úrovni spodní hrany odsávací štěrbiny a poté v úrovni spodní hrany sacího nástavce. Lepších výsledků dosáhl při umístění stolu v úrovni spodní hrany odsávací štěrbiny. Vznik většího dosahu plochy účinnosti zdůvodňuje přímějšími a kratšími proudnicemi odsávaného stopového plynu.

Pech také zkoumal zesílený štěrbinový odsávací systém s pracovním stolem, v publikaci (Pech a Pavelek 2013b) se věnoval měření rychlostního pole před sacím nástavcem s pracovním stolem v úrovni spodní hrany odsávací štěrbiny. Z výsledků bylo patrné, že se zvětšujícím pracovním parametrem  $I$  se prodlužuje zachytná vzdálenost (vzdálenost kde rychlost proudění klesla pod  $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). V dalších publikacích (Pech a Pavelek 2012a; Pech a Pavelek 2013a; Pech a Pavelek 2014) se věnoval měření účinnosti odsávání pomocí stopového plynu ( $\text{CO}_2$ ). Pracovní stůl byl umístěn ve dvou různých úrovních, a to ve výšce spodní hrany odsávací štěrbiny a v úrovni spodní hrany sacího nástavce. Výsledky měření značně ovlivnila rozdílná hustota  $\text{CO}_2$  vůči vzduchu. Těžší oxid uhličitý klesal na desku stolu, ke které přilnul, následně byl odsán, čímž se prodloužila účinná oblast.

Poslední publikoval svou bakalářskou práci Šíp (Šíp 2016) (jehož vedoucím byl Ing. Pech), který měřil účinnost zesíleného štěrbinového systému s pracovním stolem v úrovni horní hrany odsávací štěrbiny v uspořádání jak uvádí vzhůru nohama. Toto uspořádání bylo využito, aby nedocházelo jako u Pecha k ulpívání stopového plynu na pracovním stole a následnému odsávání čímž došlo k prodloužení účinné oblasti. V uspořádání vzhůru nohama se stopový plyn ( $\text{CO}_2$ ) vzdaloval od pracovního stolu, čímž modeloval pracovní stůl se, škodlivinou lehčí než vzduch (s kladným Archimedovým číslem). Z výsledků jeho práce vyplívá, že délka účinné oblasti tradičního sacího nástavce a nástavce s pracovním parametrem  $I = 0,3$  jsou stejně dlouhé. U varianty s přívodem vzduchu došlo k zúžení odsávací oblasti v prostoru bezprostředně před sacím nástavcem a zvětšení oblasti 100% účinnosti. K výraznému prodloužení odsávací oblasti došlo až pro pracovní parametr  $I = 0,6$  a  $0,9$ , kde se účinné oblasti shodně prodloužily o 80 mm.

## 2.1 Zesílený odsávací systém v praxi

Při návrhu zesíleného odsávacího systému se mohou vyskytnout různé problémy a nedostatky spojené s konkrétním řešením. Optimální provozní podmínky zesíleného odsávacího systému nemusí být v souladu s technologickými a pracovními požadavky. Proto je vhodné při návrhu vzít v úvahu následující faktory ovlivňující jeho použití (Goodfellow a Tahti 2001):

- konečná velikost místnosti,
- pohybující se zdroje a pohybující se pracovníci,
- pohyb částic ve vzduchu,
- neustálenost a nesměrovost proudu při vyšších hodnotách poměru hybnostních toků,
- vyšší pořizovací náklady odsávacího zařízení,
- vyšší náklady na další úpravy zařízení.

Výhody:

- pro stejný dosah nižší hladina hluku,
- větší dosah,
- větší provozní pohoda pracovníků s možností práce ve větším prostoru, což jsou důležité parametry pro rozvoj zesílených sacích nástavců.

### 3 MĚŘICÍ TRAŤ

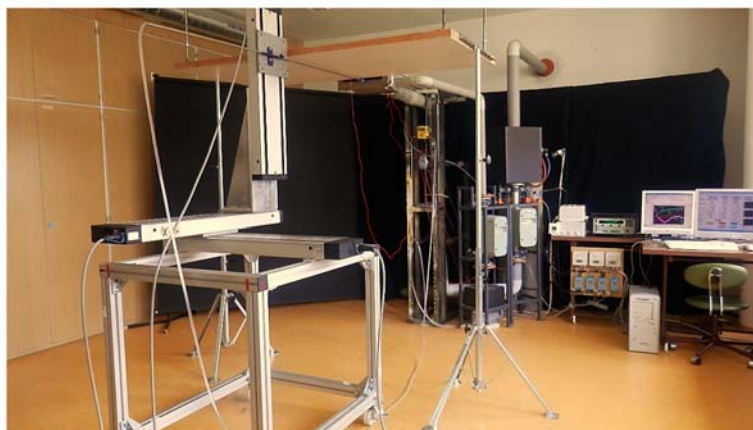
Zařízení pro testování a výzkum sacích nástavců bylo na Energetickém ústavu, FSI, VUT v Brně navrženo, sestaveno (Patočka a Janotková 2000) a postupně zdokonalováno. Pro dané experimenty bylo zařízení částečně automatizováno a dále upravováno (viz obr. 3.1, obr. 3.2 a obr. 3.3), aby mohlo pracovat ve třech hlavních konfiguracích se štěrbinovým sacím nástavcem – ve volném prostoru, s pracovním stolem – přepážkou pod sacím nástavcem a s přepážkou nad odsávací štěrbinou. Na tomto zařízení je možné použít různé metody testování sacích nástavců (Janotková et al. 2011). Jedná se např. o metodu stopového plynu, která umožňuje stanovit účinnost sacího nástavce, pro kterou je zařízení primárně uzpůsobeno. Lze zde také použít metodu proměřování rychlostí před sacím nástavcem, pro stanovení rychlostního pole nebo metodu vizualizace proudění před sacím nástavcem, např. pomocí kouře, která umožňuje především kvalitativní posouzení účinnosti odsávání. Vizualizaci proudění je možné provést také pomocí heliových bublinek aj.



*Obr. 3.1 – Zařízení pro testování a výzkum sacích nástavců se štěrbinovým sacím nástavcem ve volném prostoru*



*Obr. 3.2 – Zařízení pro testování a výzkum sacích nástavců se štěrbinovým sacím nástavcem s pracovním stolem – přepážkou pod sacím nástavcem*



*Obr. 3.3 – Zařízení pro testování a výzkum sacích nástavců  
se štěrbinovým sacím nástavcem s přepážkou nad odsávací štěrbinou*

Měřicí trať ve dvou konfiguracích schematicky zakreslená na obr. 3.4 je složena ze tří hlavních částí: odsávací větve, přívodní větve a zařízení pro měření se stopovým plynem. Detailní popis nástavců bude uveden v kapitole 3.1 v tab. 3.1 (str. 41).

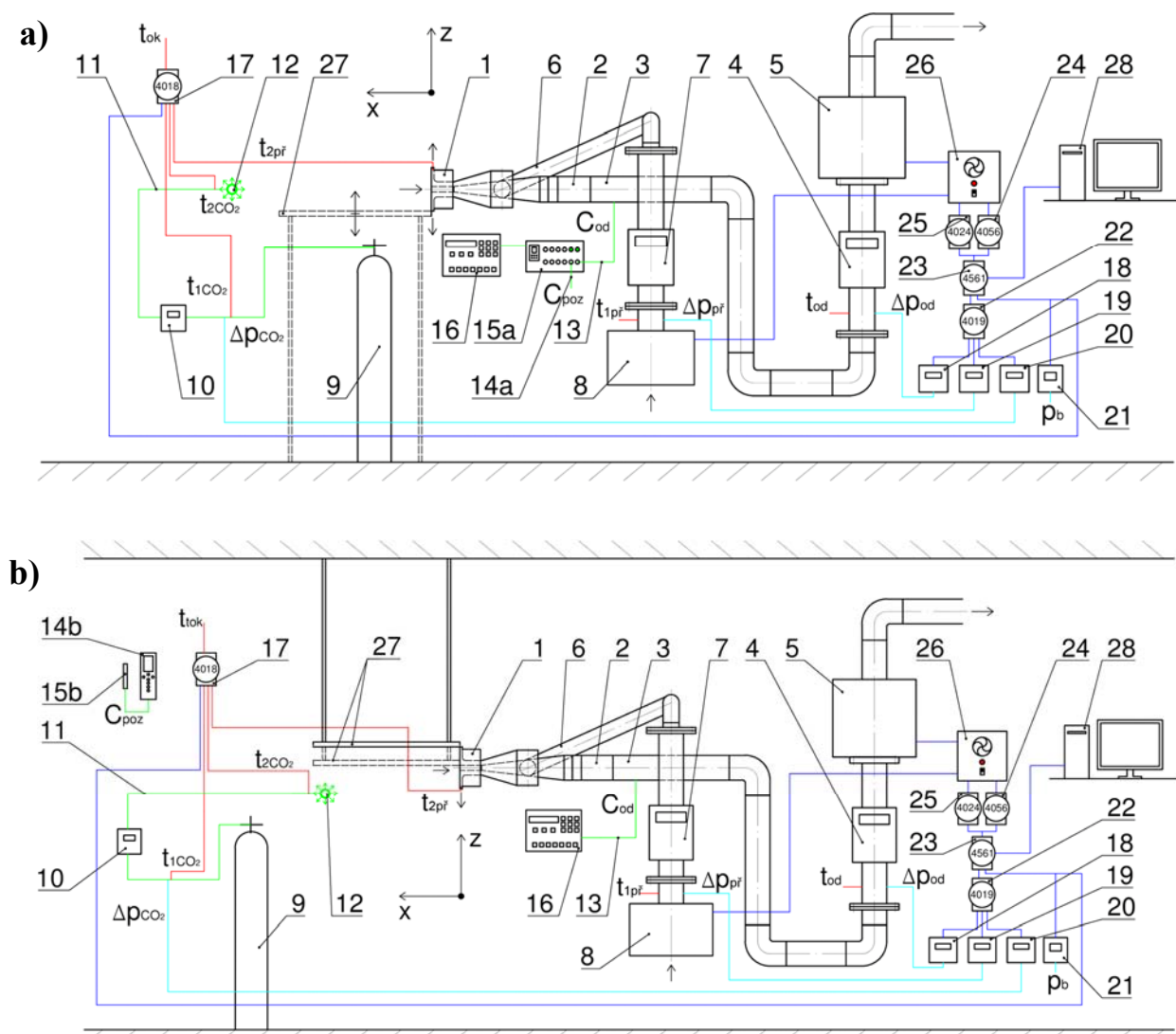
Odsávací větev připojená k zesílenému sacímu nástavci (pozice 1 v obr. 3.4) je vybavena vířičem (pozice 2), který slouží k rovnoměrnému promíchání odsátého stopového plynu se vzduchem. Dále pokračuje uklidňovacím úsekem pro měření koncentrací stopového plynu v odsávaném vzduchu (pozice 3), plovákovým průtokoměrem (pozice 4) a boxem osazeným dvěma vysokotlakými ventilátory (pozice 5).

Přívodní větev je osazena jedním vysokotlakým ventilátorem (pozice 8), plovákovým průtokoměrem (pozice 7) a s přívodní částí zesíleného sacího nástavce (pozice 1) je spojena pomocí potrubí (pozice 6).

Zařízení pro měření se stopovým plynem obsahuje tlakovou láhev se stopovým plynem a redukčním ventilem (pozice 9), elektronický průtokoměr (pozice 10), hadičky pro přívod stopového plynu (pozice 11) a všesměrové zakončení zdroje stopového plynu – porézní kuličku (pozice 12). Část pro měření koncentrace stopového plynu je pro zesílený sací systém v konfiguraci 1. – 3. (z tab. 3.1 na str. 41) zobrazeném v obr. 3.4a složena z teflonových hadiček pro odběr vzorků vzduchu (pozice 13, 14a), přepínače měřicích míst (pozice 15a) a analyzátoru plynů (pozice 16). Pro zesílený sací systém v konfiguraci 4. – 9. (z tab. 3.1 na str. 41) uvedeném v obr. 3.4b je složena z teflonové hadičky pro odběr vzorků vzduchu (pozice 13), multifunkčního měřicího přístroje (pozice 14b), sondy Indoor air quality (pozice 15b) a analyzátoru plynů (pozice 16).

Ventilátory v odsávací a přívodní větvi jsou řízeny třemi triackovými regulátory (pozice 26), které jsou ovládány moduly s analogovými výstupy (pozice 25) a o jejich uvedení do provozu se stará reléový modul (pozice 24).

V potrubí před každým průtokoměrem je měřen tlak pomocí převodníků tlaku (pozice 18, 19, 20), které jsou připojeny k převodníku signálu (pozice 22). Před průtokoměry je také měřena teplota termočlánky typu T (měď-konstantan) připojenými k měřicímu modulu (pozice 17). K tomuto modulu jsou také připojeny termočlánky měřící teplotu přiváděného vzduchu v přívodní štěrbině sacího nástavce, teplotu stopového plynu na výstupu z všesměrového zdroje a teplotu vzduchu v laboratoři. Barometrický tlak je měřen interiérovým snímačem (pozice 21). Všechny měřicí moduly jsou připojeny ke komunikačnímu modulu (pozice 23). Pro měření s přepážkou (pod sacím nástavcem se jedná o pracovní stůl) je možné použít výškově stavitelnou přepážku (pozice 27) s rozměry v ose  $x = 830$  mm a v ose  $y = 1900$  mm, která byla k tomuto účelu zkonstruována a vyrobena. Tuto přepážku je také možné za pomoci stojanů použít nad odsávací štěrbinou.



Obr. 3.4 – Schémata zařízení pro testování a výzkum sacích nástavců

**a)** ve volném prostoru nebo s pracovním stolem– přepážkou pod sacím nástavcem (konfigurace 1. – 3. z tab. 3.1 na str. 41)

**b)** s přepážkou nad odsávací štěrbinou (konfigurace 4. – 9.)

- 1 – zesílený sací nástavec, 2 – vířič, 3 – úsek pro měření koncentrací, 4 – plovákový průtokoměr v odsávací větvi, 5 – odsávací ventilátory, 6 – přívodní potrubí, 7 – plovákový průtokoměr v přívodní větvi, 8 – přívodní ventilátor, 9 – tlaková láhev se stopovým plynem a redukčním ventilem, 10 – průtokoměr stopového plynu, 11 – hadičky pro přívod stopového plynu, 12 – všesměrové zakončení zdroje stopového plynu, 13, 14a – teflonové hadičky pro odběr vzorků vzduchu, 14b – multifunkční měřicí přístroj, 15a – přepínač měřicích míst, 15b – sonda Indoor air quality, 16 – analyzátor plynů, 17 – modul pro měření teploty, 18 – převodník měření tlaku v odsávací větvi, 19 – převodník měření tlaku v přívodní větvi, 20 – převodník měření tlaku stopového plynu, 21 – převodník měření barometrického tlaku, 22 – převodník signálů z převodníků tlaku, 23 – komunikační modul, 24 – spínací modul, 25 – analogový modul, 26 – triackové regulátory, 27 – nastavitelná přepážka (pracovní stůl), 28 – PC.

Pro polohování zdroje stopového plynu a termo-anemometrických sond u zesíleného sacího systému v konfiguraci 1. – 3. z tab. 3.1 (str. 41) a při měření zachytné vzdálenosti byl použit pojezdový vozík vybavený vertikálně posuvným ramenem. Vozík se pohybuje



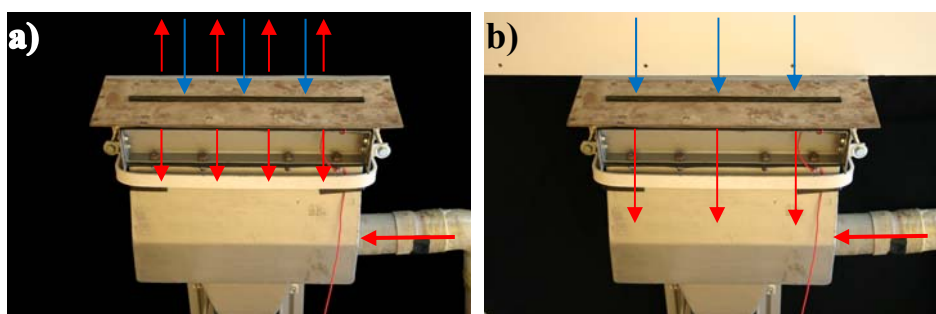
po kolejnicích, čímž umožňuje ustavit zdroj stopového plynu nebo termo-anemometry do požadované polohy na zvolené síti měřicích bodů. Pro rychlejší a přesnější ustavení v ose  $x$  je na vozík umístěna měřicí ručička a na kolejnice metr.

Při měření zesíleného sacího systému v konfiguraci 4. – 9. z tab. 3.1 (str. 41) byl pro polohování zdroje stopového plynu a termo-anemometrických sond použit tříosý traversovací systém s kontrolérem C142-4 od firmy Isel – automation, namontovaný na konstrukci z hliníkových profilů BOSCH 60 × 60 mm, který umožňuje nezávislé polohování ve třech osách, čímž se značně zjednodušilo polohování.

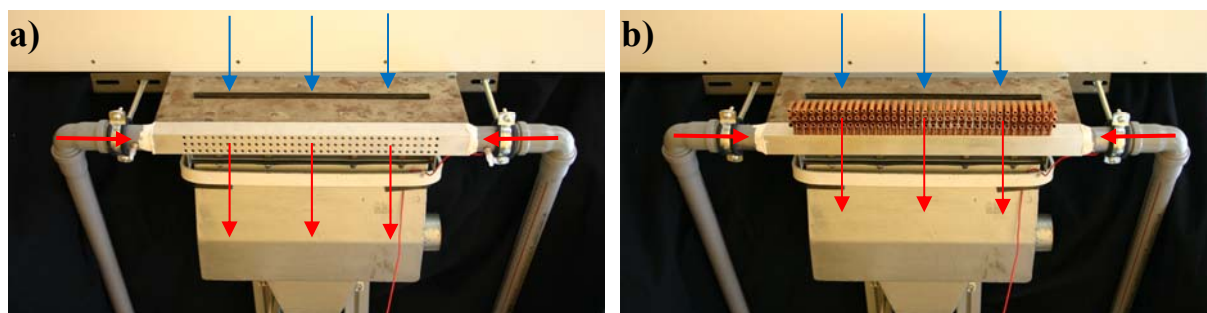
### 3.1 Zesílený štěrbinový sací nástavec

V práci je zkoumán zesílený štěrbinový sací nástavec ve čtyřech základních variantách viz níže. Tyto základní varianty byly použity v různé konfiguraci, jak ukazují tab. 3.1 (str. 41):

- zesílený štěrbinový sací nástavec ve volném prostoru – přívod vzduchu dvěma štěrbinami v přírubě (obr. 3.5a),
- zesílený štěrbinový sací nástavec s přepážkou (pracovním stolem) – přívod vzduchu jednou štěrbinou v přírubě (obr. 3.5b),
- zesílený štěrbinový sací nástavec s přepážkou – přívod vzduchu dírkami v přírubě (obr. 3.6a),
- zesílený štěrbinový sací nástavec s přepážkou – přívod vzduchu trubičkami v přírubě (obr. 3.6b).



*Obr. 3.5 – Zesílený štěrbinový sací nástavec:  
a) ve volném prostoru – přívod vzduchu dvěma štěrbinami v přírubě  
b) s přepážkou (pracovním stolem) – přívod vzduchu jednou štěrbinou v přírubě*



*Obr. 3.6 – Zesílený štěrbinový sací nástavec:  
a) s přepážkou – přívod vzduchu dírkami v přírubě  
b) s přepážkou – přívod vzduchu trubičkami v přírubě*

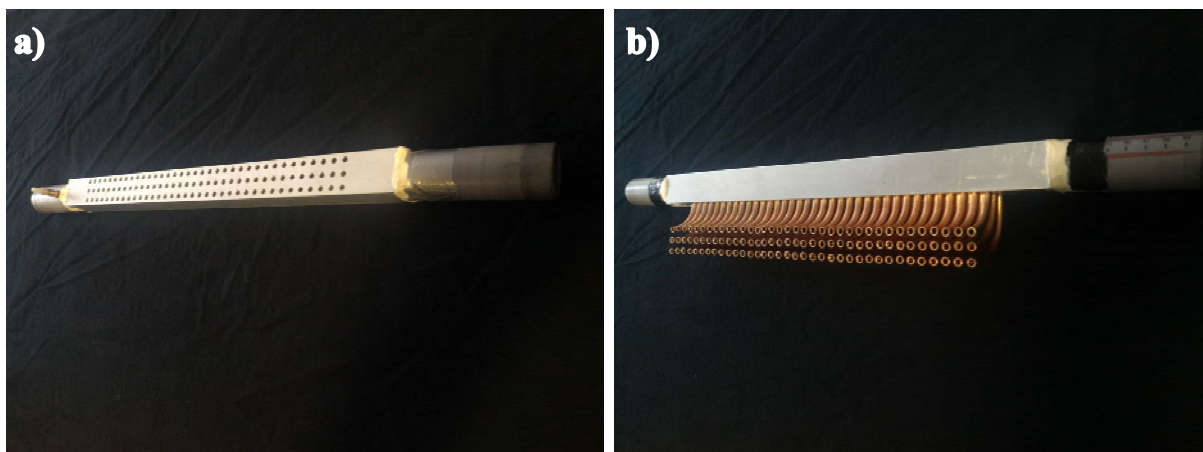
Měření účinnosti odsávání ve volném prostoru (konfigurace 1. z tab. 3.1 na str. 41) byla provedena Bouzkem (Bouzek 2004) na Odboru termomechaniky a techniky prostředí, FSI, VUT v Brně.

Měření s pracovním stolem již byla provedena v rámci této práce. Z vyhodnocení účinnosti odsávání konfigurace 1. – 3. z tab. 3.1 (str. 41) bylo vyvozeno, že oblast účinného odsávání v případě umístění sacího nástavce ve volném prostoru je značně menší oproti případům s pracovním stolem. Tento rozdíl je způsoben zejména rozdílnou hustotou stopového plynu ( $\text{CO}_2$ ) a vzduchu, kdy v případě s pracovním stolem je klesající stopový plyn částečně odsán a částečně zachycen pracovním stolem, ze kterého je následně odsán. Vliv hustoty stopového plynu je také dále rozebrán v kapitole 3.4.

Pro výzkum chování nástavce u pracovního stolu se škodlivinou lehčí než okolní vzduchu (teplé zplodiny při svařování) je potřeba při aplikaci daného stopového plynu  $\text{CO}_2$  umístit přepážku vertikálně symetricky nad odsávací šterbinu. Pro tyto účely byla navržena konfigurace 4. a 5. (obr. 3.11) s přepážkou nad odsávací šterbinou, kdy se stopový plyn ( $\text{CO}_2$ ) díky rozdílné hustotě oproti vzduchu vzdaluje od pracovního stolu ve směru osy  $-z$ , čímž se chová vůči stolu, který by byl ve standartní poloze jako plyn lehčí než vzduch.

Dalším úkolem bylo provést úpravy zesíleného sacího systému v blízkosti pracovního stolu pro zvýšení účinnosti odsávání. Z výsledků autorů Gublera a Krejčího, kteří se nejvíce věnovali přívodnímu proudu vyplynulo, že zesilující účinky by mohla zlepšit turbulizace proudění, a proto byla věnována větší pozornost přívodnímu proudu. Za tímto účelem byla navržena úprava přívodu vzduchu pro vytvoření větší třecí plochy přívodního proudu, kdy je místo šterbiny využito tři řady trubiček (vnější  $\phi 6$  mm, vnitřní  $\phi 4$  mm) po 36 ks obr. 3.7b, která byla měřena v konfiguraci 8. a 9. Tvarování trubiček a jejich vetknutí do základního přívodního profilu (čtvercový uzavřený profil  $30 \times 30 \times 2$  mm) bylo značně náročné obr. 3.8 a případná sériová výroba by byla nákladná, proto pro porovnání byla navržena ještě výrobně jednodušší varianta, která využívá přívodních dírek v základním přívodním profilu stejných rozměrů obr. 3.7a a byla dále měřena v konfiguraci 6. a 7.

Rychlost v odsávací šterbině byla dle doporučení v literatuře (Chyský a Hemzal 1993) a vzhledem k dříve provedeným měřením bez pracovního stolu (Bouzek 2004) nastavena na  $w_{od} = 8.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a udržována konstantní. Průtok přiváděného vzduchu byl udržován konstantní dle požadavku na zvolenou hodnotu pracovního parametru  $I$  dle rov (2.1).



Obr. 3.7 – Nástavec pro přívod vzduchu:

- a) dírkami
- b) trubičkami

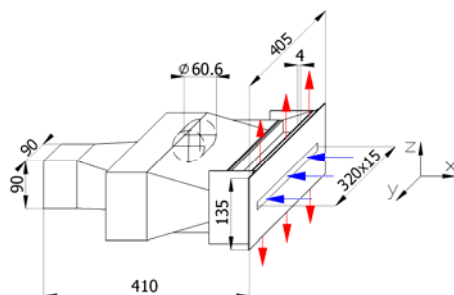


Tab. 3.1 – Konfigurace a rozměry použitých variant zesíleného odsávacího systému

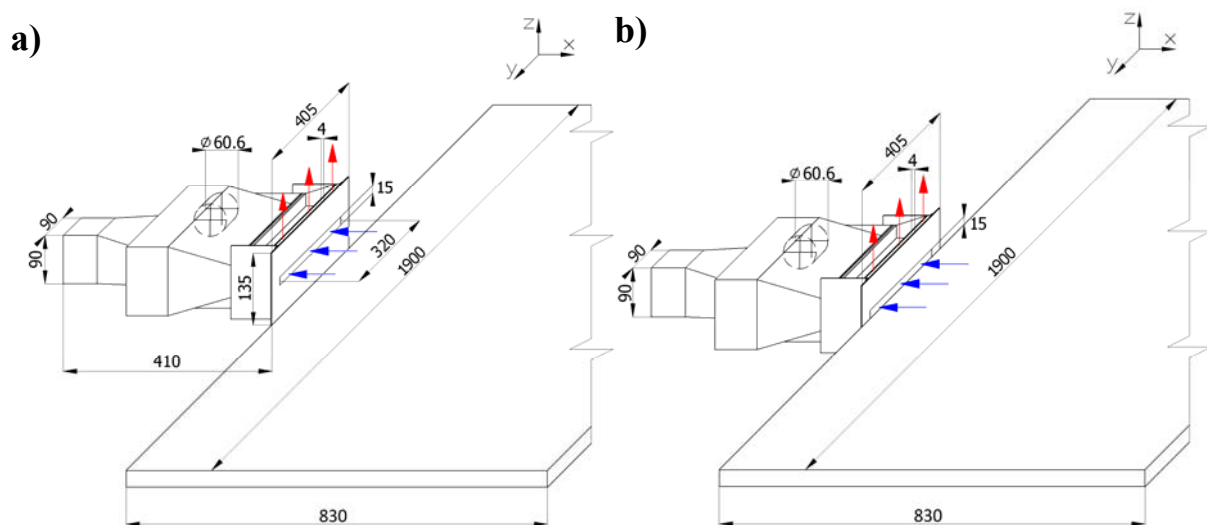
Konfigurace zesíleného odsávacího systému	Příruba	Odsávací štěrbina		Přívod			
	Rozměr [mm]	Rozměr [mm]	Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Typ	Počet [ks]	Rozměr [mm]	Plocha [mm <sup>2</sup> ]
1. Ve volném prostoru obr. 3.9	405×135	320×15	4800	štěrbina	2	325×4	2600
2. S pracovním stolem – přepážkou v úrovni spodní hrany příruby obr. 3.10a	405×135			štěrbina	1		1300
3. S pracovním stolem – přepážkou v úrovni spodní hrany odsávací štěrby obr. 3.10b	405×75			štěrbina	1		
4. S přepážkou v úrovni horní hrany příruby obr. 3.11a	405×135			štěrbina	1		
5. S přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby obr. 3.11b	405×75			štěrbina	1		
6. S přepážkou v úrovni horní hrany příruby obr. 3.12a	405×165			dírký	108	φ4	1357
7. S přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby obr. 3.12b	405×105			dírký	108		
8. S přepážkou v úrovni horní hrany příruby obr. 3.13a	405×165			trubičky	108		
9. S přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby obr. 3.13b	405×105			trubičky	108		



Obr. 3.8 – Výroba přívodu vzduchu trubičkami

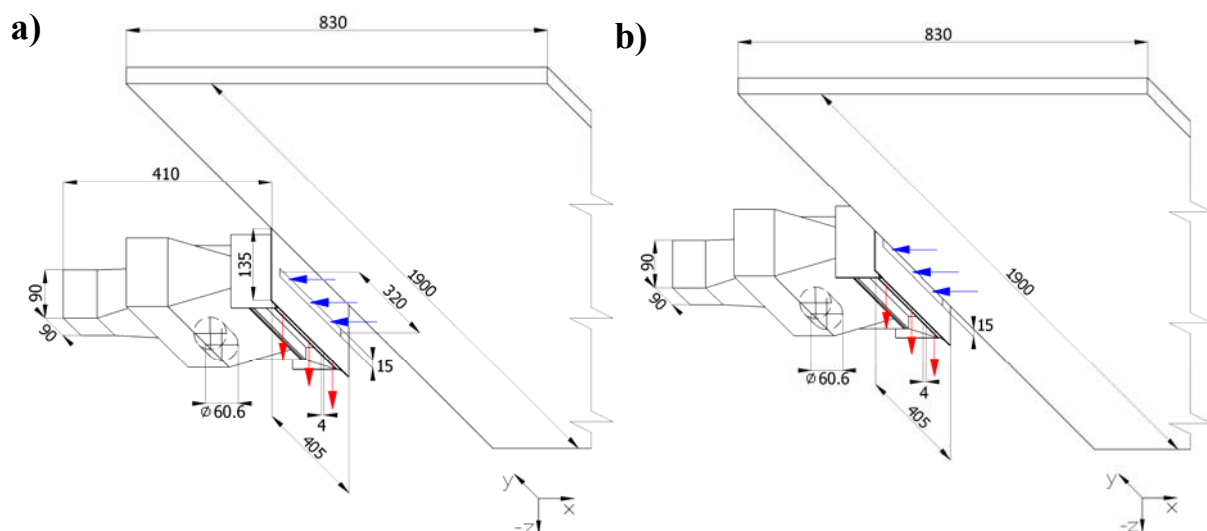


Obr. 3.9 – Zesílený štěrbinový sací nástavec umístěný ve volném prostoru – přívod dvěma štěrbinami



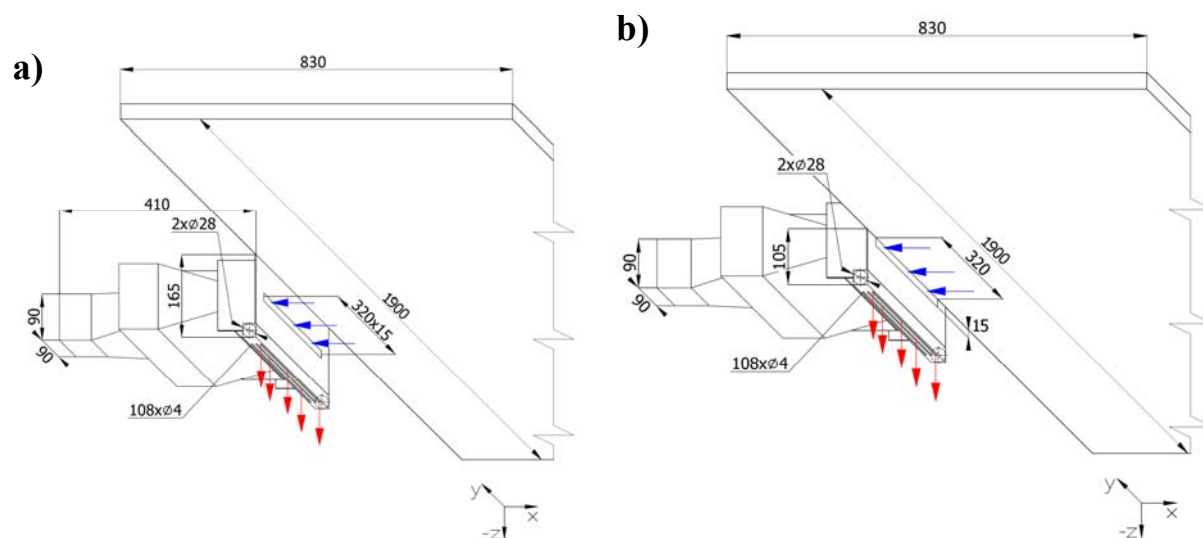
Obr. 3.10 – Zesílený štěrbinový sací nástavec s pracovním stolem – přepážkou:

- a) v úrovni spodní hrany příruby – přívod štěrbinou  
 b) v úrovni spodní hrany odsávací štěrby – přívod štěrbinou



Obr. 3.11 – Zesílený štěrbinový sací nástavec s přepážkou:

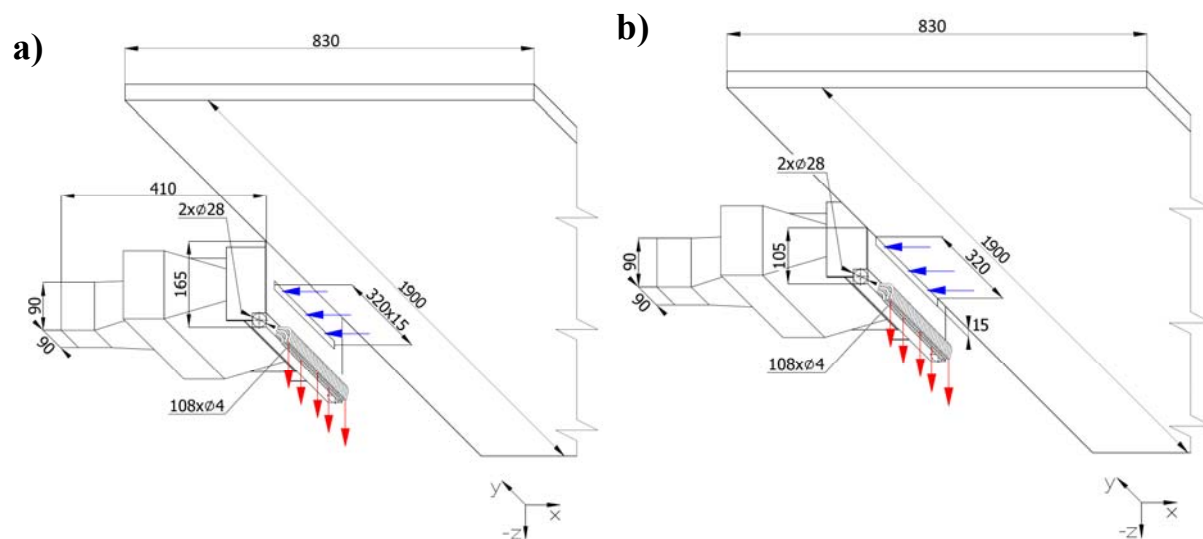
- a) v úrovni horní hrany příruby – přívod štěrbinou  
 b) v úrovni horní hrany odsávací štěrby – přívod štěrbinou



*Obr. 3.12 – Zesílený štěrbinový sací nástavec s přepážkou:*

*a) v úrovni horní hrany příruby – přívod dírkami*

*b) v úrovni horní hrany odsávací štěrby – přívod dírkami*



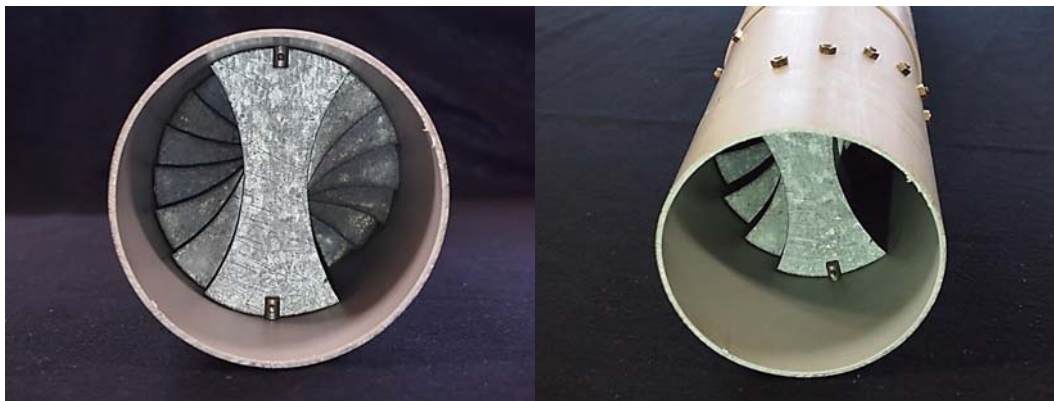
*Obr. 3.13 – Zesílený štěrbinový sací nástavec s přepážkou*

*a) v úrovni horní hrany příruby – přívod trubičkami*

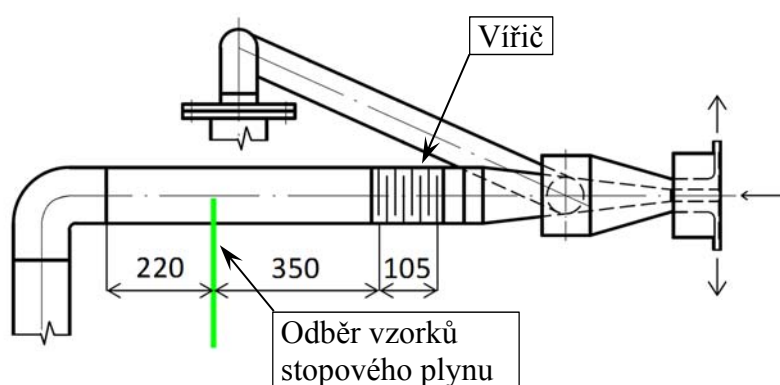
*b) v úrovni horní hrany odsávací štěrby – přívod trubičkami*

## 3.2 Vířič

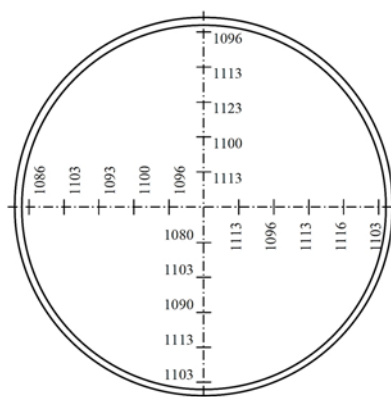
Vířič (obr. 3.14) umístěný v odsávací větvi (obr. 3.15), který slouží k rovnoměrnému promíchání odsátého stopového plynu se vzduchem je tvořen osmi lopatkami, které jsou v potrubí umístěny s roztečí 15 mm a navíc jsou vzájemně pootočené o 20°. Návrh vířiče a uklidňovacího bloku včetně ověření funkce numerickou simulací a měřením rozložení koncentrací za vířičem viz obr. 3.16 provedli Ing. Krejčí, Ph.D. a Ing. Patočka, Ph.D. v předchozím výzkumu (Patočka 2002). Odchylna hodnot v jednotlivých proměřovaných místech činila maximálně 2,05 %.



Obr. 3.14 – Pohled od potrubí s vířičem



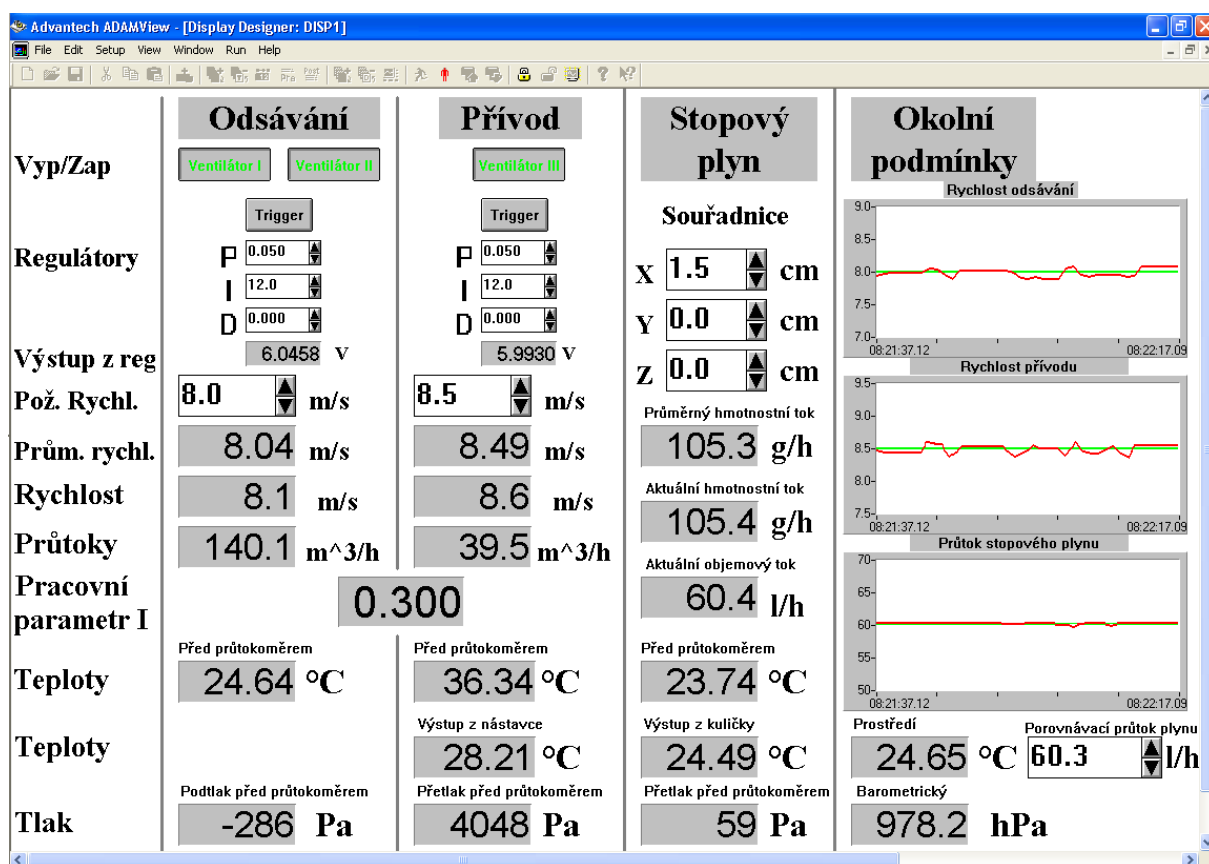
Obr. 3.15 – Poloha vířiče a odběru vzorků stopového plynu v odsávací větvi



Obr. 3.16 – Rozložení koncentrací CO<sub>2</sub> [ppm] v potrubí za vířičem (Patočka 2002)

### 3.3 Měřicí systém

Všechna měření jsou prováděna pomocí programu Adamview od firmy Advantec (Advantech 2007), který získává data přes komunikační modul (pozice 23 v obr. 3.4). V aktuálním čase jsou tato data upravena podle kalibračních rovnic jednotlivých přístrojů a převodníků a jsou dopočítány skutečné hodnoty podle aktuálních teplot a tlaků. Pro vizualizaci těchto hodnot je v tomto programu vytvořen virtuální měřicí přístroj (obr. 3.17) (Pech a Pavelek 2012b), který zobrazuje přepočítané (skutečné) veličiny – teploty, tlaky, objemové a hmotnostní průtoky, rychlosti v odsávací a přívodní šterbině a pracovní parametr  $I$  zesíleného sacího nástavce (poměr hybnostních toků přiváděného a odsávaného vzduchu) dle rov. (2.1) (Hyldgard 1987).



Obr. 3.17 – Virtuální měřicí přístroj v programu Adamview

Z virtuálního měřicího přístroje je možné také plynule nastavit požadované rychlosti v odsávací a přívodní šterbině. Program pomocí PI regulátoru nastaví a udržuje potřebný výkon ventilátorů, aby bylo dosaženo požadovaných rychlostí. V programu jsou vytvořeny také tři diagramy časových průběhů průtoků odsávaného a přiváděného vzduchu a také průtoků stopového plynu, který musí být po celou dobu měření konstantní.

O řízení ventilátorů se starají tři speciálně navržené triackové regulátory (obr. 3.18), které jsou vybavené integrovaným obvodem pro řízení motorů a opticky oddělenými analogovými vstupy. Regulátory se zapínají přivedením +5 V a řídí se analogovým signálem 0-10 V. Obsluhu regulátorů zajišťuje modul ADAM-4056S, který provádí jejich zapnutí (+5 V) a modul ADAM-4024 (obr. 3.19), který generuje řídicí signál (0-10 V).

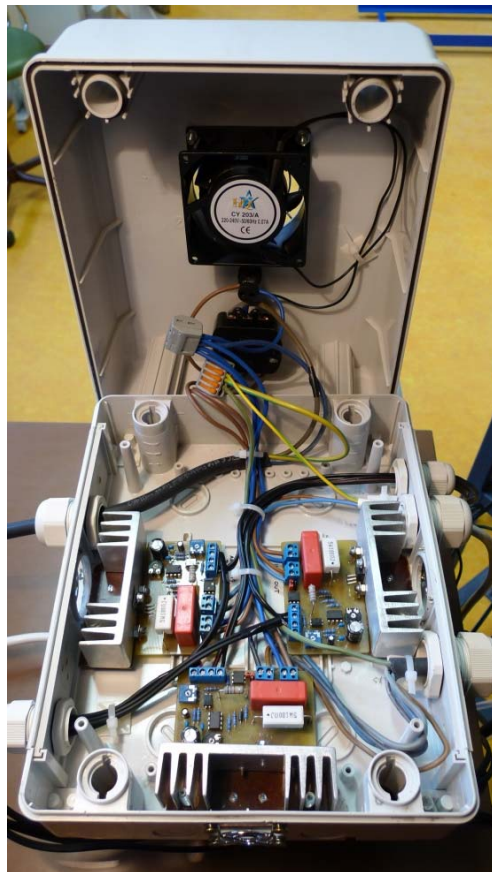
Měření teploty zajišťuje šest termočlánků typu T (měď-konstantan) připojených k měřicímu modulu ADAM-4018. Pro měření tlaku (přetlaku) před průtokoměry v odsávací větvi a v přívodu stopového plynu jsou využity dva převodníky tlaku PTLN-K 2,5K a tlak



v přívodní větvi měří jeden převodník tlaku PTLN-K 20K od firmy Airflow (obr. 3.19). Barometrický tlak je měřen interiérovým snímačem Comet T7418. Všechny snímače tlaku jsou připojeny k modulu Adam-4019. Měření průtoku stopového plynu obstarává elektronický průtokoměr Floline SEF-51 od firmy STEC. Průtok odsávaného vzduchu je měřen plovákovým průtokoměrem MFE 80 a v příváděcí větvi kvůli menšímu průtoku typem MFE 40 oba od firmy VEB MLW Prüfgerätewerk Medingen. Plovákové průtokoměry mají elektronické převodníky, které jsou připojené k modulu ADAM-4019. Komunikaci měřicích modulů s počítačem přes USB rozhraní zprostředkovává modul ADAM-4561.

Pro měření koncentrace stopového plynu v odsávaném vzduchu je využíván analyzátor plynů Multigas monitor Type 1302 od firmy Brüel & Kjær (obr. 3.24), připojený k počítači pomocí rozhraní RS-232-C. Koncentrace stopového plynu na pozadí je měřena u konfigurace 1. – 3. z tab. 3.1 (str. 41) také pomocí Multigas monitoru Type 1302. U konfigurace 4. – 9. byl využíván multifunkční měřicí přístroj Testo 435 se sondou IAQ<sup>8</sup>.

Pro přívod stopového plynu je použit dvoustupňový redukční ventil na tlakové láhvi, který je doplněn o jehlový ventil umožňující jemnější regulaci průtoku stopového plynu a nádobou pro snížení kmitání tlaku, resp. průtoku způsobeného redukčním ventilem. Toto kmitání bylo největší při větším ochlazení redukčního ventilu způsobeném expandujícím plynem, proto byl redukční ventil doplněn ohřevem.



Obr. 3.18 – Triackové regulátory



Obr. 3.19 – Sestava převodníků tlaku a měřicích modulů ADAM

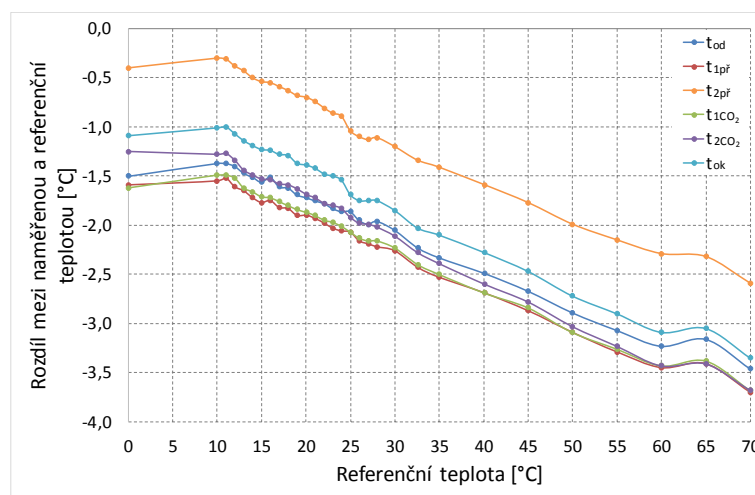
Kalibrace termočlánků byla provedena pomocí generátoru 0 °C s chlazenou deskou a v dalších bodech pomocí kalorimetru naplněného vodou, kdy byla jako referenční teploměr

<sup>8</sup> IAQ – Indoor Air Quality

použita ponorná/vpichová sonda Pt100 připojená k teploměru Testo 735. S touto připojitelnou vysoce přesnou ponornou/vpichovou sondou Pt100 lze dosáhnout systémové přesnosti až 0,05 K s rozlišením 0,001 K. Kalibrační křivky šesti termočlánků jsou ukázána na obr. 3.20.

Popis měřených teplot:

$t_{od}$	[°C]	– teplota vzduchu v odsávacím potrubí před průtokoměrem,
$t_{1př}$	[°C]	– teplota vzduchu v příváděcím potrubí před průtokoměrem,
$t_{2př}$	[°C]	– teplota přiváděného vzduchu v ústí příváděcí šterbiny/dírek/trubiček,
$t_{1CO_2}$	[°C]	– teplota stopového plynu před průtokoměrem,
$t_{2CO_2}$	[°C]	– teplota stopového plynu před všesměrovým zakončením,
$t_{ok}$	[°C]	– teplota okolí.



Obr. 3.20 – Kalibrační křivky termočlánků

Rozdíly ve výsledných kalibračních křivkách jednotlivých termočlánků jsou způsobeny různou délkou přívodů jednotlivých termočlánků, dále možnými rozdíly ve vytvořených svarech a spojích s měřicím přístrojem. Zvláště kvůli poslednímu zmíněnému vlivu je nutné kalibraci provést na sestavě ve stavu ve kterém je poté použita pro měření.

Virtuální měřicí přístroj programu Adamview využívá následující rovnice pro výpočty (jsou při tom použity jednotky, které je možné odečíst přímo z přístrojů):

- Výpočet objemového průtoku vzduchu vychází ze vztahu pro přepočet objemového průtoku plovákovým průtokoměrem (Pavelek a Štětina 2007):

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_0 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 \cdot (\rho_p - \rho_1)}{\rho_1 \cdot (\rho_p - \rho_0)}} \quad (3.1)$$

kde:

$\dot{V}_1$	[m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	– objemový průtok vzduchu plovákovým průtokoměrem,
$\dot{V}_0$	[m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	– naměřený objemový průtok vzduchu průtokoměrem,
$\rho_0$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	– hustota vzduchu při kalibraci,
$\rho_1$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	– hustota vzduchu při teplotě $T_1$ před průtokoměrem,
$\rho_p$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	– hustota plováku.

Za podmínek  $\rho_0 \ll \rho_p$  a  $\rho_l \ll \rho_p$ , lze vztah zjednodušit na tvar:

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_0 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_1}}, \quad (3.2)$$

Po dosazení ze stavové rovnice je tvar pro objemový průtok odsávaného vzduchu:

$$\dot{V}_{1od} = \dot{V}_{0od} \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 \cdot r_{vzd} \cdot T_{1od}}{p_{1aod}}}, \quad (3.3)$$

kde:

$$p_{1aod} = p_b - p_{1od}, \quad (3.4)$$

$\dot{V}_{1od}$	$[\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$	– objemový průtok odsávaného vzduchu,
$\dot{V}_{0od}$	$[\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$	– naměřený objemový průtok odsávaného vzduchu průtokoměrem,
$r_{vzd}$	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	– měrná plynová konstanta vzduchu ( $287,04 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ),
$T_{1od}$	$[\text{K}]$	– teplota odsávaného vzduchu před průtokoměrem,
$p_{1aod}$	$[\text{Pa}]$	– absolutní tlak odsávaného vzduchu před průtokoměrem,
$p_b$	$[\text{Pa}]$	– barometrický tlak,
$p_{1od}$	$[\text{Pa}]$	– podtlak odsávaného vzduchu před průtokoměrem.

Následně je možné hustotu odsávaného vzduchu při kalibraci nahradit ze stavové rovnice, čímž se rovnice upraví na:

$$\dot{V}_{1od} = \dot{V}_{0od} \cdot \sqrt{\frac{p_0 \cdot T_{1od}}{p_{1aod} \cdot T_0}}, \quad (3.5)$$

kde:

$p_0$	$[\text{Pa}]$	– absolutní tlak vzduchu při kalibraci průtokoměru ( $101\,300 \text{ Pa}$ ),
$T_0$	$[\text{K}]$	– teplota vzduchu při kalibraci průtokoměru ( $273,15 \text{ K}$ ).

Dosazením stavové rovnice do rovnice (3.2) je získána rovnice pro přiváděný objemový průtok vzduchu:

$$\dot{V}_{1př} = \dot{V}_{0př} \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 \cdot r_{vzd} \cdot T_{1př}}{p_{1apř}}}, \quad (3.6)$$

kde:

$$p_{1apř} = p_b + p_{1př}, \quad (3.7)$$

$\dot{V}_{1př}$	$[\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$	– objemový průtok přiváděného vzduchu,
$\dot{V}_{0př}$	$[\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$	– naměřený objemový průtok přiváděného vzduchu průtokoměrem,
$T_{1př}$	$[\text{K}]$	– teplota přiváděného vzduchu před průtokoměrem,
$p_{1apř}$	$[\text{Pa}]$	– absolutní tlak přiváděného vzduchu před průtokoměrem,
$p_{1př}$	$[\text{Pa}]$	– přetlak přiváděného vzduchu před průtokoměrem.



Nyní je opět možné hustotu odsávaného vzduchu při kalibraci nahradit ze stavové rovnice, čímž se rovnice (3.6) upraví na:

$$\dot{V}_{1př} = \dot{V}_{0př} \cdot \sqrt{\frac{p_0 \cdot T_{1př}}{p_{1apř} \cdot T_0}}, \quad (3.8)$$

- Pro určení rychlosti proudění vzduchu v odsávací štěrbině je použita rovnice:

$$w_{od} = \frac{p_{1aod} \cdot \dot{V}_{0od} \cdot T_{2od}}{p_b \cdot T_{1od} \cdot b \cdot l_{od} \cdot 3600}, \quad (3.9)$$

kde:

$w_{od}$	[m·s <sup>-1</sup> ]	– rychlost odsávaného vzduchu ve vstupním průřezu,
$T_{2od}$	[K]	– teplota vzduchu na vstupu do odsávací štěrbiny (teplota okolí),
$b$	[m]	– šířka odsávací štěrbiny (15 mm),
$l_{od}$	[m]	– délka odsávací štěrbiny (320 mm).

Obdobně lze určit rychlost proudění na výstupu z přívaděcí štěrbiny:

$$w_{př} = \frac{p_{1apř} \cdot \dot{V}_{0př} \cdot T_{2př}}{p_b \cdot T_{1př} \cdot s \cdot l_{př} \cdot 3600}, \quad (3.10)$$

kde:

$w_{př}$	[m·s <sup>-1</sup> ]	– rychlost proudění vzduchu z přívaděcí štěrbiny,
$T_{2př}$	[K]	– teplota vzduchu na výstupu z přívaděcí štěrbiny,
$s$	[m]	– šířka přívaděcí štěrbiny (4 mm),
$l_{př}$	[m]	– délka přívaděcí štěrbiny (325 mm).

- Výpočet hmotnostního průtoku odsávaného a přiváděného vzduchu vychází ze stavové rovnice. Rovnice hmotnostního průtoku odsávaného vzduchu má tedy tvar:

$$\dot{m}_{od} = \frac{\dot{V}_{1od} \cdot p_{1aod}}{r_{vzd} \cdot T_{1od} \cdot 3600}, \quad (3.11)$$

kde:

$\dot{m}_{od}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	– hmotnostní průtok odsávaného vzduchu.
----------------	-----------------------	---

Rovnice hmotnostního průtoku přiváděného vzduchu má tvar:

$$\dot{m}_{př} = \frac{\dot{V}_{1př} \cdot p_{1apř}}{r_{vzd} \cdot T_{1př} \cdot 3600}, \quad (3.12)$$

kde:

$\dot{m}_{př}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	– hmotnostní průtok přiváděného vzduchu.
----------------	-----------------------	--

- Pracovní parametr z rov (2.1) lze po dosazení vztahů (3.9), (3.10), (3.11) a (3.16) a úpravě psát ve tvaru:

$$I = \frac{p_{1apř}^2 \cdot \dot{V}_{1př}^2 \cdot T_{2př} \cdot b \cdot l_{od} \cdot T_{1od}^2}{p_{1aod}^2 \cdot \dot{V}_{1od}^2 \cdot T_{2od} \cdot s \cdot l_{př} \cdot T_{1př}^2}, \quad (3.13)$$

- Výpočet objemového průtoku stopového plynu vychází z rovnosti hmotnostních toků stopového plynu při kalibračních parametrech a při měřených parametrech. Po dosazení stavové rovnice dostáváme:

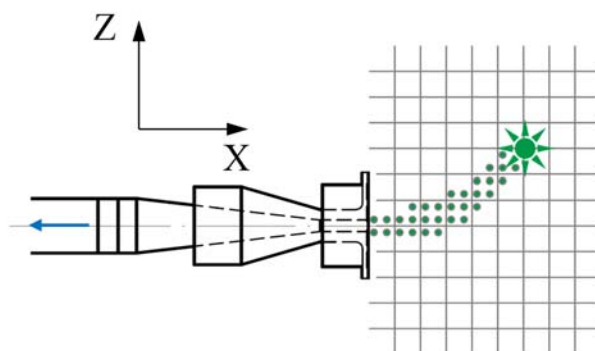
$$\dot{V}_{1CO_2} = \frac{\dot{V}_{0CO_2} \cdot p_{0CO_2} \cdot T_{1CO_2}}{p_{1aCO_2} \cdot T_{0CO_2}} \quad (3.14)$$

kde:

$\dot{V}_{1CO_2}$	[m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	– objemový průtok stopového plynu průtokoměrem,
$\dot{V}_{0CO_2}$	[m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	– naměřený objemový průtok stopového plynu průtokoměrem,
$p_{0CO_2}$	[Pa]	– absolutní tlak vzduchu při kalibraci průtokoměru (101 325 Pa),
$T_{1CO_2}$	[K]	– teplota stopového plynu před průtokoměrem,
$p_{1aCO_2}$	[Pa]	– absolutní tlak stopového plynu před průtokoměrem,
$T_{0CO_2}$	[K]	– teplota stopového plynu při kalibraci průtokoměru (298,15 K).

### 3.4 Měření účinnosti odsávání

Pro měření účinnosti odsávání byla použita metoda stopového plynu. Tato metoda spočívá v zavádění vhodného stopového plynu pomocí porézní kuličky (všesměrového zdroje<sup>9</sup> (Patočka et al. 2001)) do zvoleného místa před sacím nástavcem. Porézní kulička je umísťována do měřicích bodů na zvolené síti v měřené rovině viz obr. 3.21. Pro každý bod této měřené roviny jsou pro konfiguraci 1. – 3. z tab. 3.1 (str. 41) odebírány vzorky vzduchu pomocí přepínače měřicích míst (obr. 3.24), a to z okolního vzduchu v místnosti a z odsávacího potrubí za vířičem (viz kap. 3.2), který je použit pro homogenizování odsátého stopového plynu v potrubí společně s odsátým vzduchem. Vzorky vzduchu jsou analyzovány pomocí Multigas monitoru Type 1302 od firmy Brüel & Kjær (obr. 3.24).



Obr. 3.21 – Metoda stopového plynu

Pro konfiguraci 4. – 9. z tab. 3.1 (str. 41) jsou pro každý bod měřené roviny odebírány vzorky vzduchu z odsávacího potrubí za vířičem a analyzovány pomocí Multigas monitoru Type 1302 od firmy Brüel & Kjær. Současně je pomocí multifunkčního měřicího přístroje Testo 435 se sondou IAQ kontinuálně měřena koncentrace stopového plynu v místnosti tzv. na pozadí. Měření každého bodu je zdlouhavé, jelikož je potřeba po přesunutí zdroje škodliviny ustálit proudění. Následně se může provést měření koncentrace stopového plynu v odsávaném vzduchu, a to vždy alespoň 3x a před každým měřením se také proplachují trubičky a měřicí komora novým vzorkem vzduchu, aby v ní nezůstaly rezidua z předchozího měření.

<sup>9</sup> Porovnání přívodu stopového plynu (CO<sub>2</sub>) trubičkou a porézní kuličkou směřující vzhůru uvádí obr. 3.22 a obr. 3.23. Z interferogramu na obr. 3.22 je patrné, že přiváděný CO<sub>2</sub> trubičkou se v klidném vzduchu šíří ve směru osy trubičky a následně vlivem vyšší hustoty vůči okolnímu vzduchu klesá dolů. Oproti tomu z interferogramu přívodu CO<sub>2</sub> porézní kuličkou (obr. 3.23) je patrné, že se CO<sub>2</sub> šíří rovnoměrně do všech směrů a poté opět vlivem větší hustoty oproti vzduchu klesá dolů (Patočka 2002).

Účinnost odsávání v daném bodě je poté možné vypočítat ze vztahu dle (Pedersen a Nielsen 1991; ČSN\_EN\_1093-4+A1 2008), který je upraven na výpočet s průměrnými hodnotami kvůli opakovanému měření v každém bodě:

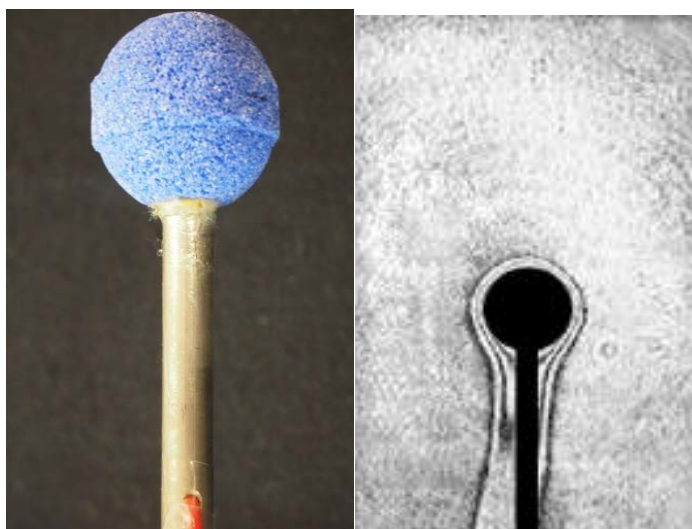
$$\eta = \frac{\bar{C}_{od} - \bar{C}_{poz}}{\bar{C}_{ref}}, \quad (3.15)$$

kde:

$\eta$	[1]	– účinnost odsávání škodlivin,
$\bar{C}_{od}$	[ppm]	– průměrná koncentrace stopového plynu v odsávaném vzduchu,
$\bar{C}_{poz}$	[ppm]	– průměrná koncentrace stopového plynu na pozadí,
$\bar{C}_{ref}$	[ppm]	– průměrná referenční koncentrace odpovídající zachycení 100 % stopového plynu.



Obr. 3.22 – Vlevo trubička směřující vzhůru pro přívod stopového plynu vpravo interferogram přívodu CO<sub>2</sub> trubičkou (Patočka 2002)



Obr. 3.23 – Vlevo porézní kulička směřující vzhůru pro přívod stopového plynu vpravo interferogram přívodu CO<sub>2</sub> porézní kuličkou (Patočka 2002)

Referenční koncentrace je určována vždy před začátkem měření s využitím papírového trychtýře, který je užší částí vložen do odsávací štěrbině a do rozšiřující se části je vložen zdroj stopového plynu (porézní kulička). Poté je opakovaně měřena koncentrace stopového plynu v odsávaném vzduchu (v němž je zachycen všechen stopový plyn) a dále se měří koncentrace stopového plynu na pozadí. Nyní lze referenční koncentraci definovat jako:



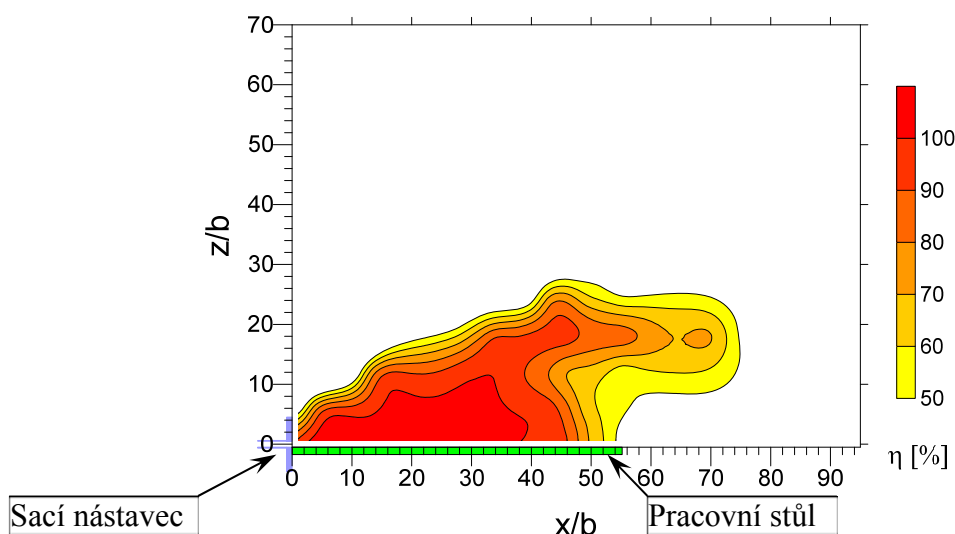
Obr. 3.24 – Multigas monitor (nahore)  
a přepínač měřicích míst (dole)

$$\bar{C}_{ref} = \bar{C}_{od,ref} - \bar{C}_{poz,ref} \quad (3.16)$$

kde:

- $\bar{C}_{od,ref}$  [ppm] – průměrná koncentrace odpovídající zachycení 100 % stopového plynu při referenčním měření,  
 $\bar{C}_{poz,ref}$  [ppm] – průměrná koncentrace stopového plynu na pozadí při referenčním měření.

Výsledky měření účinnosti odsávání jsou poté vizualizovány pomocí softwaru Surfer od firmy Golden Software (Golden\_Software 2017). V Surferu je z naměřených dat vytvořena pravidelná síť uzlových bodů metodou Kriging (Golden\_Software 2017). Tato metoda patří mezi nejflexibilnější a nejpřesnější metody transformace prostorově orientovaných dat s lineárním variogramem a je vhodná pro většinu dat. Kriging určí rozptyl zkoumané proměnné jako funkci vzdáleností jednotlivých bodů měření. Kdy existuje korelace mezi hodnotami proměnné v jednotlivých bodech. Tato korelace po určité vzdálenosti zaniká, poté lze jednotlivá měření považovat za navzájem nezávislá. Tento proces je označován jako variogram. Výsledky této metody jsou poměrně hladké. Síť vytvořená metodou Kriging je poté použita pro vytvoření izoploch účinností viz obr. 3.25.



Obr. 3.25 – Plochy účinností ( $I = 0,3$ ) vytvořené z naměřených dat v programu Surfer

Při použití metody stopového plynu hraje důležitou roli volba použitého plynu, který musí být nehořlavý, nevýbušný, netoxický, bez zápachu, nesmí reagovat se vzduchem a být absorbován vnitřním vybavením budov, měl by mít nízkou cenu, vzhledem k potřebnému množství. Použitý stopový plyn by již neměl být přítomen v měřeném prostředí či jeho okolí, protože se může promíchávat se stopovým plynem (ČSN\_EN\_1093-4+A1 2008). Pokud je stopový plyn ve vzduchu přítomný, je vhodnější použít pro měření jiný plyn. Plyny, vhodné pro tuto metodu, jsou:

- oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ )
- fluorid sírový ( $\text{SF}_6$ )
- oxid dusný ( $\text{N}_2\text{O}$ )
- freon 12 (Dichlordifluormethan) ( $\text{CCl}_2\text{F}_2$ )
- helium (He)

Při výběru stopového plynu je rovněž důležitá jeho hustota. Stopový plyn by měl mít takovou hustotu, která nejvíce odpovídá charakteru modelované škodliviny.

Oxid uhličitý, fluorid sírový, oxid dusný a freon mají při stejné teplotě a tlaku vyšší hustotu než vzduch. Helium má při stejných podmínkách hustotu nižší než vzduch. Vlastnosti oxidu uhličitého a ostatních plynů vhodných pro metodu stopového plynu jsou uvedeny v tab. 3.2.

Při experimentálním měření účinnosti odsávání zesíleného sacího nástavce byl jako stopový plyn použit oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ). Důvodů pro jeho volbu bylo hned několik:

- s tímto stopovým plynem byly experimenty prováděny již dříve (možnost porovnání),
- jeho cena je nižší oproti fluoridu sírovému ( $\text{SF}_6$ ), oxidu dusnému ( $\text{N}_2\text{O}$ ) a heliu (He),
- možnost detekce  $\text{CO}_2$  dvěma přístroji,
- nižší nebezpečnost oproti  $\text{N}_2\text{O}$ ,
- podílí se na skleníkovém efektu, ale je odbouratelný fotosyntézou oproti  $\text{SF}_6$ .

Tab. 3.2 – Porovnání vlastností vzduchu a používaných stopových plynů při normálních fyzikálních podmínkách (Perry a Green 1997)

	<b>Molární hmotnost [g·mol<sup>-1</sup>]</b>	<b>Měrná plynová konstanta [J·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>]</b>	<b>Hustota [kg·m<sup>-3</sup>]</b>	<b>Měrný objem [m<sup>3</sup>·kg<sup>-1</sup>]</b>
Vzduch	28,951	287,185	1,292	0,774
Oxid uhličitý	44,010	188,918	1,964	0,509
Fluorid sírový	146,060	56,924	6,517	0,153
Oxid dusný	44,013	188,906	1,964	0,509
Freon 12 (Dichlordifluormethan)	120,910	68,764	5,395	0,185
Helium	4,003	2077,017	0,179	5,599

Jak již bylo uvedeno v kapitole 3.1 a dále rozebráno v této kapitole (3.4), použitý stopový plyn –  $\text{CO}_2$  má větší hustotu oproti vzduchu, a i když je přiváděn v relativně malém množství na výstupu z všesměrového zdroje se ihned nepromíchá s okolním vzduchem, ale postupně padá ve směru gravitace. Bylo by tedy výhodné použít jako stopový plyn helium, které má menší hustotu, avšak použitý analyzátor plynů nedisponuje filtrem pro měření koncentrace helia. Z tohoto důvodu byl opět použit oxid uhličitý jako stopový plyn a bylo přistoupeno k měření účinnosti odsávání zesíleného sacího nástavce v konfiguracích 4. – 9. z tab. 3.1

(str. 41) tj. s přepážkou nad odsávací šterbinou. Toto uspořádání modeluje pracovní stůl se, škodlivinou lehčí než vzduch (s kladným Archimedovým číslem). Pro výpočet hustoty stopového plynu vůči pracovnímu stolu je využito rovnice pro výslednou vztlakovou sílu na jednotku objemu vycházející z Archimedova zákona:

$$G = G_{vz} - G_g, \quad (3.17)$$

kde:

$G$   $[\text{N} \cdot \text{m}^{-3}]$  – výsledná vztlaková síla na jednotku objemu,

$G_{vz}$   $[\text{N} \cdot \text{m}^{-3}]$  – vztlaková síla na jednotku objemu,

$$G_{vz} = |g| \cdot \rho_{\infty}, \quad (3.18)$$

$G_g$   $[\text{N} \cdot \text{m}^{-3}]$  – tíhová síla na jednotku objemu,

$$G_g = |g| \cdot \rho_{\text{CO}_2}, \quad (3.19)$$

$g$   $[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$  – tíhové zrychlení ( $9,80665 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ),

$\rho_{\text{CO}_2}$   $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$  – hustota stopového plynu,

$\rho_{\infty}$   $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$  – hustota vzduchu.

Po dosazení rovnic (3.18) a (3.19) a vypočítaných hustot (pro průměrné podmínky při měření) dle tab. 3.2 do rov. (3.17) je poté vztlaková síla na jednotku objemu pro  $\text{CO}_2$  ve vzduchu  $-6,59 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$  (při stejné teplotě  $\text{CO}_2$  a vzduchu).

Vůči přepážce nad odsávací šterbinou bude tato výslednice působit opačným směrem, takže bude mít hodnotu  $6,59 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$ . Nyní je již možné dosazením rovnic (3.18) a (3.19) a hustoty vzduchu z tab. 3.2 do rov. (3.17) vypočítat hustotu  $\text{CO}_2$  vůči přepážce nad odsávací šterbinou, která je  $0,62 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  (při normálních fyzikálních podmínkách). Pro srovnání stejnou hustotu bude mít vzduch při teplotě  $569 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Z rovnice (1.9) je možné určit Archimedovo číslo. Pro použitý stopový plyn  $\text{CO}_2$  a přepážku pod sacím nástavcem je Archimedovo číslo pro průměrné podmínky při měření  $Ar_{\text{CO}_2, \text{přepážka pod}} = -0,0012$  a vůči přepážce nad odsávací šterbinou  $Ar_{\text{přepážka nad}} = 0,0012$ . Dále pro  $\text{SF}_6$  je Archimedovo číslo  $Ar_{\text{SF}_6, \text{přepážka pod}} = -0,0093$  a pro helium  $Ar_{\text{He, přepážka pod}} = 0,0020$ . V případě odsávání je vliv hustoty výrazný i při Archimedově čísle blízkém hodnotě 0,001. Ale pokud by šlo o přívod vzduchu jednalo by se pouze o mírně neizotermní proud, který by se v prostoru šířil téměř přímočaře.

Na začátku této kapitoly bylo uvedeno, že porézní kulička byla umísťována do měřicích bodů na zvolené síti v měřené rovině. Měřicí rovina byla vždy vertikální, vedoucí osou sacího nástavce. Počátek souřadného systému byl totožný se středem odsávací šterbiny.

U konfigurace 1. z tab. 3.1 (str. 41) u které měření provedl Bouzek (Bouzek 2004) byla měřicí síť čtvercová s roztečí mezi měřicími body 30 mm, což odpovídá dvojnásobku šířky odsávací šterbiny. První sloupec sítě ale není možné umístit do počátku souřadného systému, z důvodu poloměru porézní kuličky, který činí 15 mm. V každém bodě byla měřena koncentrace stopového plynu na pozadí 3–4 krát a v odsávaném vzduchu 4–5 krát, vždy se střídalo měření na pozadí a v odsávaném vzduchu. Roviny obsahovaly 36 až 114 bodů.

U konfigurace 2. a 3. z tab. 3.1 (str. 41) byla měřicí síť volena dle aktuálních koncentrací, kdy rozteč mezi měřicími body v ose  $z$  byla 90 mm a základní rozteč mezi měřicími body v ose  $x$  byla 60 mm a dle vzdálenosti od odsávacího nástavce a aktuálních koncentrací byla zkracována na 45 mm a výjimečně také prodloužena až na 180 mm. První sloupec sítě je opět posunut o poloměr porézní kuličky (15 mm), a také první řada u stolu je posunuta o zmíněných 15 mm. V každém bodě byla měřena koncentrace stopového plynu na pozadí i v odsávaném vzduchu 3 krát, vždy se střídalo měření na pozadí a v odsávaném vzduchu (po 2 minutách) po posledním měření následoval jeden cyklus pro ruční posunutí vozík do dalšího měřicího



bodu a ustálení proudění. Měření v jednom bodě včetně cyklu pro posuv vozíku a ustálení proudění trvalo 16 minut. Roviny obsahovaly 43 až 140 bodů.

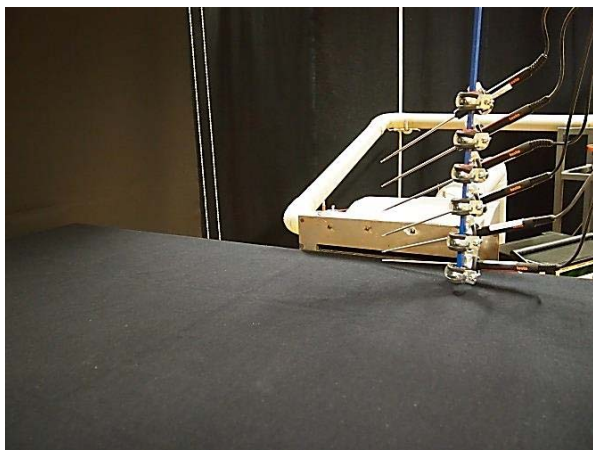
Konfigurace 4. až 9. z tab. 3.1 (str. 41) byla měřicí síť zvolena čtvercová s roztečí mezi měřicími body 45 mm. První sloupec měřicí sítě je opět posunut o poloměr porézní kuličky (15 mm), a také první řada u stolu je posunuta o zmíněných 15 mm. V každém bodě byla měřena koncentrace stopového plynu na pozadí kontinuálně každou sekundu a v odsávaném vzduchu 3-4 krát, v průběhu jedné měřicí periody která trvala 5 minut. Využitím traverzovacího systému a separátního měření koncentrace stopového plynu na pozadí klesla doba měření na méně než třetinu. Roviny obsahovaly 85 až 106 bodů.

### 3.5 Měření rychlostního pole

Rychlostní pole ve sledované části prostoru bylo měřeno soustavou termo-anemometrických sond ve formě žhavených NTC<sup>10</sup> kuliček (pro potlačení fluktuací proudění, obr. 3.26) s průměrem 3 mm a časovou konstantou 4 s, připojených do dvou datalogerů Testo 454 ovládaných kontrolní jednotkou Testo 350 M/XL (obr. 3.28). Jelikož žhavené kuličky nejsou prakticky směrově závislé (proud by hlavně neměl přicházet ze strany držáku), jedná se o měření absolutních rychlostí. Předností termo-anemometrů jsou relativně malé rozměry sond, které příliš nenarušují rychlostní pole.

Díky 6 resp. 8 sondám je možné získat poměrně přesný popis rychlostního pole proudícího vzduchu, které je možné porovnat s polem účinnosti odsávání a poté může sloužit jako rychlejší alternativa k měření metodou stopového plynu.

Při různém úhlu natočení sondy vůči směru proudění se může naměřená rychlost lišit od skutečné rychlosti, příčinou je turbulence způsobená držákem. Na obr. 3.29 je zobrazeno, jak by se mohla naměřená rychlost lišit.



Obr. 3.26 – Termo-anemometrické sondy se žhavenou kuličkou (přepážka v úrovni spodní hrany odsávací štěrby)



Obr. 3.27 – Měření proudového pole osmy termo-anemometrickými sondami se žhavenou kuličkou – přívod trubičkami (přepážka v úrovni horní hrany odsávací štěrby)

Při měření rychlosti v konfiguraci 3. z tab. 3.1 (str. 41) bylo použito 6 sond, jejichž měřicí kuličky se pohybovaly v ose sacího nástavce a byly upevněny k pojezdovému vozíku v úhlu 30° vůči rovině příruby. Vzdálenost prvního sloupce sítě od příruby byla 5 mm a první sonda

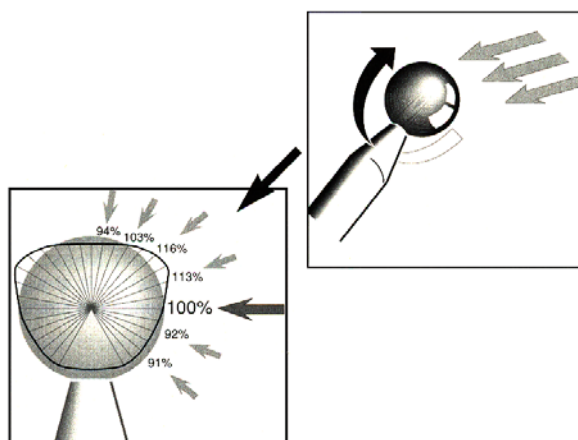
<sup>10</sup> NTC - negative temperature coefficient – s rostoucí teplotou klesá odpor

byla umístěna 7,5 mm nad stolem, tj. v ose odsávací štěrby a rozteč mezi sondami poté byla 15, 30, 45, 45 a 45 mm jak ukazuje obr. 3.26. Měřeny byly dvě (pro  $I = 0$ ) resp. tři (pro  $I = 0,3$ ,  $I = 0,6$  a  $I = 0,9$ ) horizontální roviny s roztečí 33 mm (1. a 2. rovina) a 40 mm (2. a 3. rovina) mezi sebou, posuv v ose  $x$  byl 22,5 mm a ve větší vzdálenosti 45 mm. Celkem bylo 31–94 měřicích poloh (186–564 měřicích bodů) v každé rovině. Po přesunu sond do dané polohy následovalo 30 s pro ustálení proudění a dalších 30 s probíhalo měření.



Obr. 3.28 – Kontrolní jednotka  
Testo 350 M/XL a datalogery Testo 454

Měření rychlosti v konfiguraci 4. – 9. již bylo provedeno s 8 sondami, jejichž měřicí kuličky se opět pohybovaly v ose sacího nástavce, ale pro pohyb již byl použit traverzovací systém. Technologie upevnění byla také změněna a sondy již byly upevněny rovnoběžně s přírubou. Vzdálenost prvního sloupce sítě od příruby byla 15 mm (konfigurace 4. a 5.), 35 mm (konfigurace 6. a 7.) a 65 mm (konfigurace 8. a 9.). První sonda byla od pracovního stolu vzdálena 7,5 mm a rozteč mezi sondami byla nastavena na 30 mm (při rozteči 15 mm již docházelo ke kolizi držáků sond) viz obr. 3.27. Pro zjemnění sítě byla druhá horizontální rovina posunuta pouze o 15 mm ve směru osy  $z$ , čímž se doměřili body mezi sondami a výsledná rozteč mezi měřicími body byla 15 mm (do vzdálenosti 232,5 mm od stolu ve směru osy  $z$ ). Poté ještě následovalo měření třetí horizontální roviny, která již dodržovala rozteč 30 mm a jejíž poslední sonda sahala do vzdálenosti 450 mm od pracovního stolu ve směru osy  $z$ . Posuv v ose  $x$  byl 15 mm. Celkem bylo 50–115 měřicích poloh (400–920 měřicích bodů) v každé rovině. Po přesunu sond do dané polohy následovalo 15 s pro ustálení proudění a dalších 40 s probíhalo měření.



Obr. 3.29 – Vliv směru proudění na naměřenou hodnotu rychlosti (Testo 2002)



Měření záchytné vzdálenosti v ose odsávací štěrbiny probíhalo pomocí jedné kuličkové sondy (popsané v této kapitole), která byla umístěna na pojezdovém vozíku. Pro konkrétní objemové průtoky odsávaného a přiváděného vzduchu byla hledána vzdálenost, ve které poklesne rychlost v ose odsávací štěrbiny na  $0,5$  resp.  $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Ukázkou z tohoto měření pro různé konfigurace zesíleného sacího systému lze vidět na obr. 3.30 a obr. 3.31. Současně probíhalo měření příkonu ventilátorů a statických tlaků na odsávací, resp. přívodní větvi zesíleného odsávacího systému.

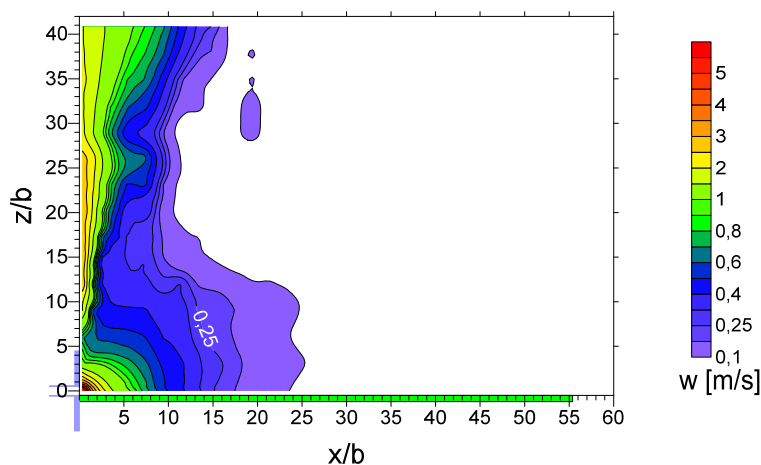


*Obr. 3.30 – Měření záchytné vzdálenosti v ose odsávací štěrbiny s přepážkou v úrovni horní hrany příruby: vlevo přívod štěrbinou, vpravo přívod dírkami*



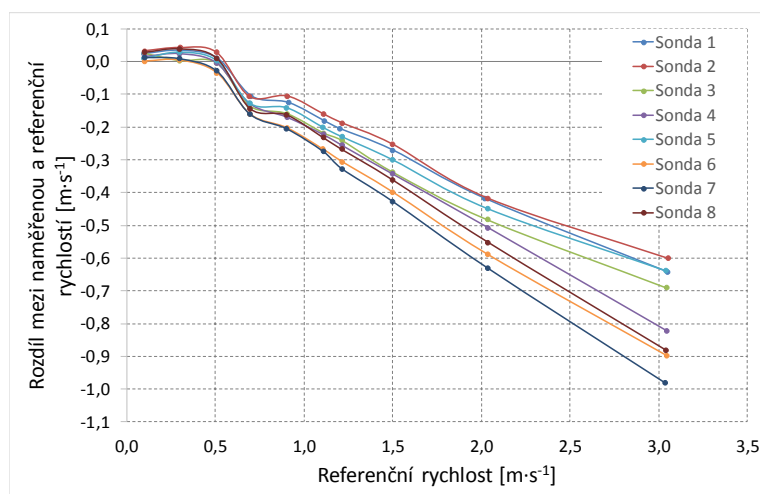
*Obr. 3.31 – Měření záchytné vzdálenosti v ose odsávací štěrbiny s přepážkou v úrovni horní hrany příruby – přívod trubičkami*

Výsledky měření rychlostního pole lze následně vizualizovat pomocí programu Surfer (obr. 3.32), podobně jako výsledky měření účinnosti odsávání.



Obr. 3.32 – Rychlostní pole ( $I = 0,3$ ) vytvořené z naměřených dat v programu Surfer

Kalibrace termo-anemometrických sond byla provedena pomocí kalibrátoru StreamLine Pro Automatic Calibrator od firmy Dantec Dynamics. Kalibrátor je možné použít pro široký rozsah rychlostí od  $0,02$  do  $300 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Kalibrovaná sonda se umísťuje na výstup trysky, jež generuje volný proud s nízkou turbulencí, který je použit jako referenční rychlost při kalibraci (Dantec\_Dynamics). Kalibrační křivky osmi termo-anemometrických sond jsou ukázána na obr. 3.33.



Obr. 3.33 – Kalibrační křivky termo-anemometrických sond

Termo-anemometrické senzory (původních 6 ks) byly dodány a kalibrovány s jinou měřicí jednotkou. V použitém zapojení byly přidány navíc dva senzory, a proto místo původní měřicí jednotky byly využity dva datalogery pro sběr dat, aby bylo možné využít všech 8 termo-anemometrických senzorů. Výrobce Testo doporučuje kalibrovat, pokud je použito jiné zapojení, proto bylo nutné provést kalibraci, ve které lze pozorovat velké rozdíly mezi referenční a naměřenou rychlostí při kalibraci.

### 3.6 Vizualizace kouřovou metodou

Tato metoda patří mezi nejjednodušší způsoby zjištění proudnic, tvaru proudu, turbulentních či laminárních oblastí proudění aj. Vizualizace kouřovou metodou se provádí zaváděním kouře do proudu vzduchu hřebenovou tryskou, jednoduchou tryskou nebo zaváděním do přívodního vzduchovodu aj.

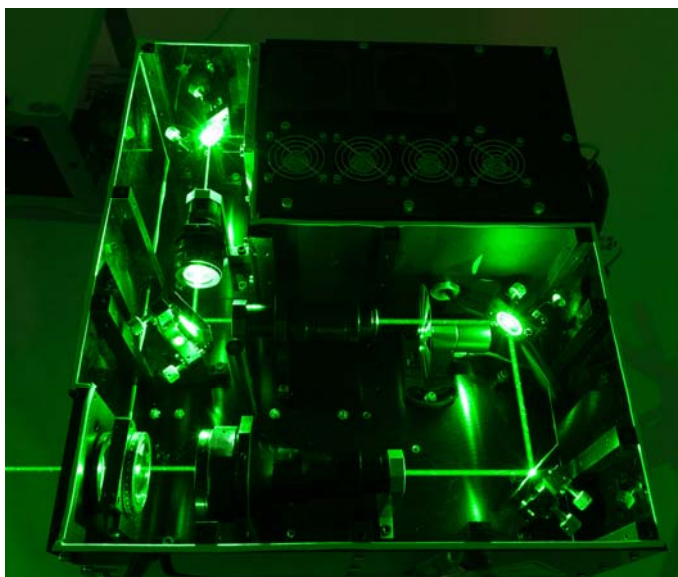
Pro vizualizace prováděné v rámci výzkumu účinnosti odsávání škodlivin šterbinovým sacím nástavcem se zesíleným odsáváním byl použit generátor mlhy Nebelgerät 195 SG (obr. 3.34) o příkonu 2200 W od německé firmy Safex (Safex 2010).



*Obr. 3.34 – Generátor mlhy Nebelgerät 195 SG*

Generátor produkuje mlhu z roztoku vody, glycerínu a dalších příměsí. Lze ho doplnit dávkovacím zařízením a speciálními koncovkami pro generování mlhy žádanou intenzitou a žádaným směrem. Má nastavitelný výstupní výkon a možnost časového ovládání. Produkce vznikající mlhy je až  $1100 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  (Safex 2010). K přívodní trysce mlhového generátoru se připojuje speciální hadice, pomocí které je možné přivést mlhu na požadované místo, nebo na ni napojit hřebenovou trysku.

Pro vytvoření laserové roviny byl použit laserový nůž (obr. 3.35), jehož základ tvoří 2W kontinuální laser s vlnovou délkou 532 nm. Laserový svazek prochází optickou cestou, která obsahuje expandér, tvarovač a přerušovač svazku, zrcátka a válcovou čočku. Svazek kruhového průřezu je průchodem touto cestou rozšířen na světelnou rovinu. Expandér mění průměr svazku, tvarovač mění profil intenzity svazku z gaussovského na rovnoměrný a přerušovač je schopný svazek přerušovat a tím jej např. synchronizovat se záznamovou kamerou. Válcová čočka je vyměnitelná a upravuje geometrii světelné roviny, slouží i k jejímu natočení či změně šířky (Kořán 2013).



*Obr. 3.35 – Laserový nůž*

Vizualizace proudění kouřovou metodou v okolí zesíleného štěrbinového sacího nástavce v blízkosti pracovního stolu – přepážky přesněji vizualizace odsávání, byla provedena v rámci pojednání ke státní doktorské zkoušce (Pech 2013). Na základě literární rešerše dále vyplynulo, že zesilující účinky by mohla zlepšit turbulizace proudění, a proto byla věnována větší pozornost přívodnímu proudu.

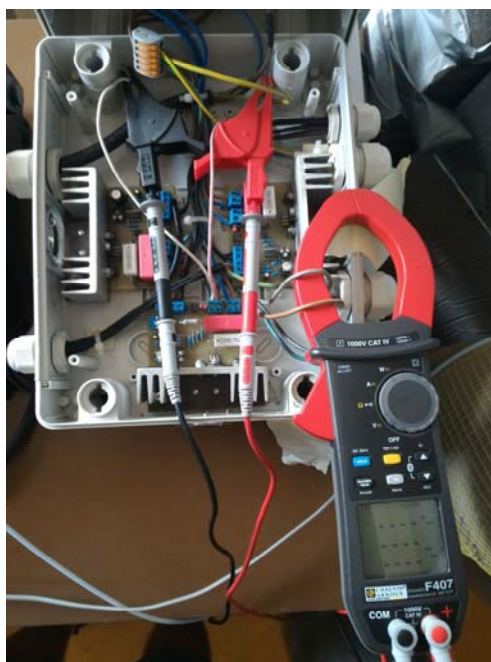
V práci byla proto vizualizace kouřovou metodou využita pro vizualizaci proudu vzduchu vystupujícího z přívodní štěrbině, dírek a trubiček. Pomocí laserové roviny byly osvětleny dvě svislé roviny – první kolmá na přírubu jdoucí středem příruby a druhá rovnoběžná s přírubou jdoucí středem příváděcí štěrbině, resp. prostřední řadou dírek nebo trubiček. V tomto případě je kouř vytvořený generátorem přiváděn do sání přívodního ventilátoru.

Fotoaparát byl umístěn kolmo na světelnou rovinu a byla pořízena série 15–34 snímků následně bylo k obrazové analýze vybráno 7–15 snímků. Přednostně byl vybírán každý druhý pořízený snímek pro zohlednění chování proudu v průběhu celé doby fotografování.

Vybrané snímky byly analyzovány v softwaru Interfer. Tento program slouží pro obrazovou analýzu snímků pořízených při kouřové vizualizaci. Na snímky byla aplikována detekční metoda určování hranice kouře v místě změny intenzity světla vůči okolí (tzv. podle paty).

### 3.7 Měření příkonu

Měření příkonu ventilátorů bylo prováděno pomocí digitálního klešťového multifunkčního měřicího přístroje F407 (obr. 3.36) od firmy Chauvin Arnoux. Měřicí přístroj měřil výstupní napětí na výstupu z regulátorů pomocí svorek a výstupní proud indukčními kleštěmi. Měření probíhalo současně s měřením zachytné vzdálenosti, kdy každé nastavení průtoku bylo měřeno 150–300 s. Výsledný naměřený příkon je podstatně větší, než by byl u finálního výrobku, což je způsobeno použitými vysokotlakými ventilátory ETA, které musí být osazeny z důvodu použití víříče a plovákových průtokoměrů, které mají velkou tlakovou ztrátu. Naměřený příkon tedy slouží hlavně pro porovnání energetické náročnosti jednotlivých konfigurací zesílených sacích nástavců v daném experimentálním zařízení, jelikož zejména víříč a průtokoměry mají velké tlakové ztráty.



Obr. 3.36 – Měření příkonu ventilátorů

Při porovnání energetické náročnosti zesílených a tradičních sacích nástavců pracujících v provozních podmínkách je třeba hodnotit zejména příkon potřebný pro překonání tlakových ztrát, jelikož konfigurace vzduchovodů aj. mohou být velice odlišné.

Pro porovnání energetické náročnosti pouze zesíleného sacího nástavce byl vypočítán (z rovnice (1.14)) ztrátový příkon nutný pro překonání tlakových ztrát a vytvoření potřebného dynamického tlaku.

### 3.8 Měření tlakové ztráty

Na konfiguracích 4. – 9. z tab. 3.1 (str. 41) byl pro různé průtoky měřen pomocí multifunkčního měřicího přístroje Testo 435 (obr. 3.37) statický tlak  $p_s$  (vůči okolí), a to v potrubí za sacím nástavcem a v přívodním potrubí, resp. potrubích (u konfigurací 6. – 9., kde je přívod z obou stran základního profilu byl odběr tlaků vyveden na obou stranách a sveden pomocí T-kusu do jedné hadičky). Následně byl vypočítán dynamický tlak:

$$p_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2, \quad (3.20)$$

kde:

$p_d$	[Pa]	– dynamický tlak,
$\rho$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	– hustota vzduchu v místně měření statického tlaku,
$w$	[m·s <sup>-1</sup> ]	– rychlost proudění v místně měření statického tlaku.

Dynamický tlak byl poté použit pro dopočítání celkového tlaku vůči okolí:

$$p_c = p_s + p_d, \quad (3.21)$$

kde:

$p_c$	[Pa]	– celkový tlak (vůči okolí),
$p_s$	[Pa]	– statický tlak (vůči okolí),



Obr. 3.37 – Multifunkční měřicí přístroj Testo 435

## 4 VIZUALIZACE PROUDĚNÍ Z PŘIVÁDĚCÍ VÝUSTKY

Vyhodnocení okrajů, osy a rozšíření proudu z přiváděcí štěrby, resp. dírek nebo trubiček je uvedeno v tab. 4.1 a průměrné hodnoty jsou vyznačené do pořízených (referenčních) snímků jednotlivých variant obr. 4.1, obr. 4.2 a obr. 4.3.

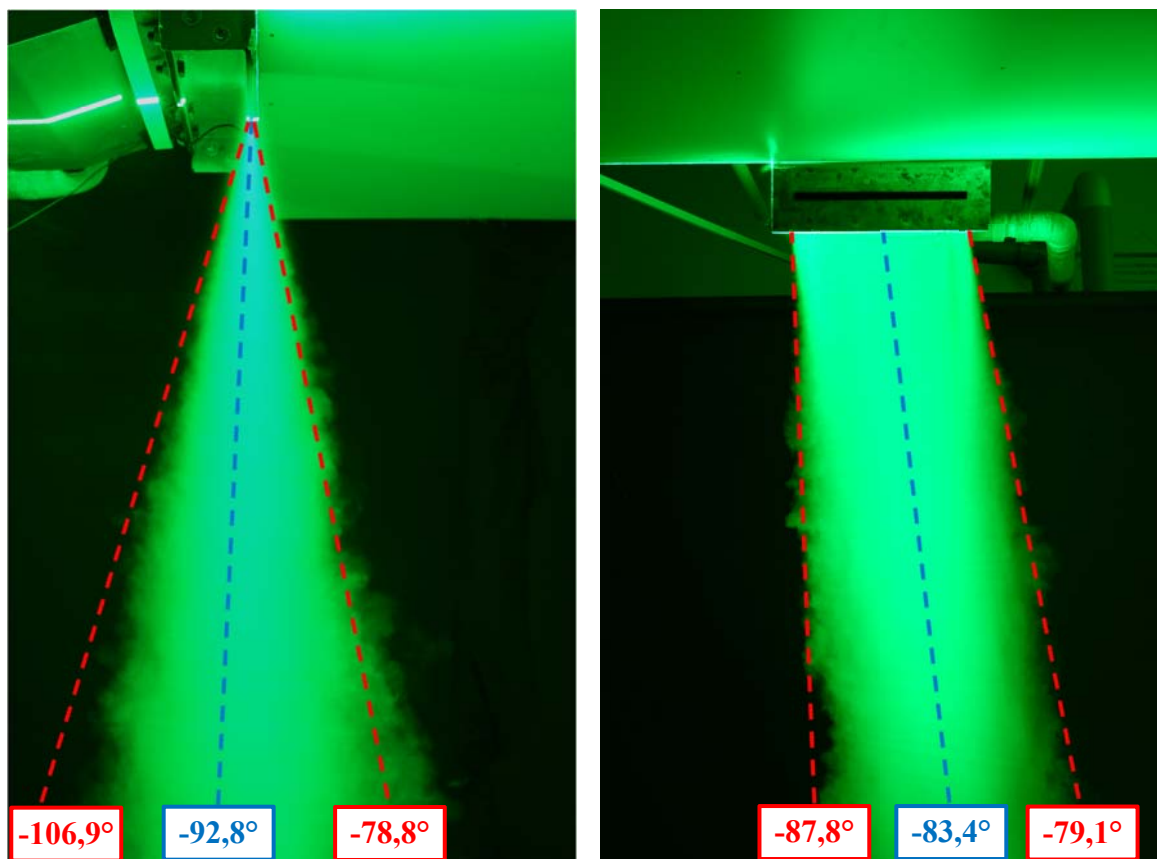
Tab. 4.1 – Vyhodnocené úhly přírodních proudů

Typ přívodu	Pohled	Nastavení	Levý okraj	Osa	Pravý okraj	Rozšíření
			[°]	[°]	[°]	[°]
Štěrby	boční	$I = 0,3$	-108,3	-94,0	-79,7	28,6
		$I = 0,6$	-104,8	-90,6	-76,4	28,4
		$I = 0,9$	-107,4	-93,8	-80,2	27,2
		<b>Průměr</b>	<b>-106,9</b>	<b>-92,8</b>	<b>-78,8</b>	<b>28,1</b>
	čelní	$I = 0,3$	-88,2	-84,6	-81,0	7,2
		$I = 0,6$	-87,2	-82,2	-77,1	10,1
		$I = 0,9$	-88,0	-83,6	-79,3	8,7
		<b>Průměr</b>	<b>-87,8</b>	<b>-83,4</b>	<b>-79,1</b>	<b>8,6</b>
Dírky	boční	$I = 0,3$	-112,3	-84,7	-57,1	55,2
		$I = 0,6$	-111,7	-86,2	-60,7	51,1
		$I = 0,9$	-110,6	-85,3	-60,0	50,6
		<b>Průměr</b>	<b>-111,6</b>	<b>-85,4</b>	<b>-59,3</b>	<b>52,3</b>
	čelní	$I = 0,3$	-71,9	-89,4	-104,8	-11,2
		$I = 0,6$	-69,2	-90,1	-109,5	-19,3
		$I = 0,9$	-69,5	-89,9	-109,1	-18,9
		<b>Průměr</b>	<b>-70,2</b>	<b>-89,0</b>	<b>-107,8</b>	<b>-16,5</b>
Trubičky	boční	$I = 0,3$	-96,9	-83,7	-70,6	26,3
		$I = 0,6$	-99,4	-86,4	-73,4	26,0
		$I = 0,9$	-97,9	-85,3	-72,6	25,3
		<b>Průměr</b>	<b>-98,1</b>	<b>-85,1</b>	<b>-72,2</b>	<b>25,9</b>
	čelní	$I = 0,3$	-96,1	-90,8	-85,4	10,7
		$I = 0,6$	-92,2	-88,9	-85,7	6,5
		$I = 0,9$	-91,7	-88,2	-84,6	7,1
		<b>Průměr</b>	<b>-93,3</b>	<b>-89,3</b>	<b>-85,2</b>	<b>8,1</b>



Přívodní proud vzduchu ze štěrbin v rovině kolmé na přírubu jdoucí středem příruby (obr. 4.1 vlevo) je relativně symetrický s průměrným rozšířením  $28,1^\circ$ . Jeho osa se pouze mírně odkládání (o  $2,8^\circ$ ) od pracovního stolu.

V rovině rovnoběžné s přírubou jdoucí středem příváděcí štěrbin (obr. 4.1 vpravo) je již ale situace v daném zařízení jiná. Dochází zde totiž k výraznějšímu odklonu proudu vpravo. Osa proudu se průměrně odklání od svislého směru o  $6,6^\circ$ . Tato asymetrie je způsobena přívodem vzduchu ke štěrbině pouze z jedné strany. Proud se v této rovině mírně rozšiřuje v průměru o  $8,6^\circ$ . Odklon proudu přiváděného vzduchu vpravo (viz čelní pohled na obr. 4.1 vpravo) by bylo možné eliminovat např. symetrickým přívodem vzduchu ke štěrbině.

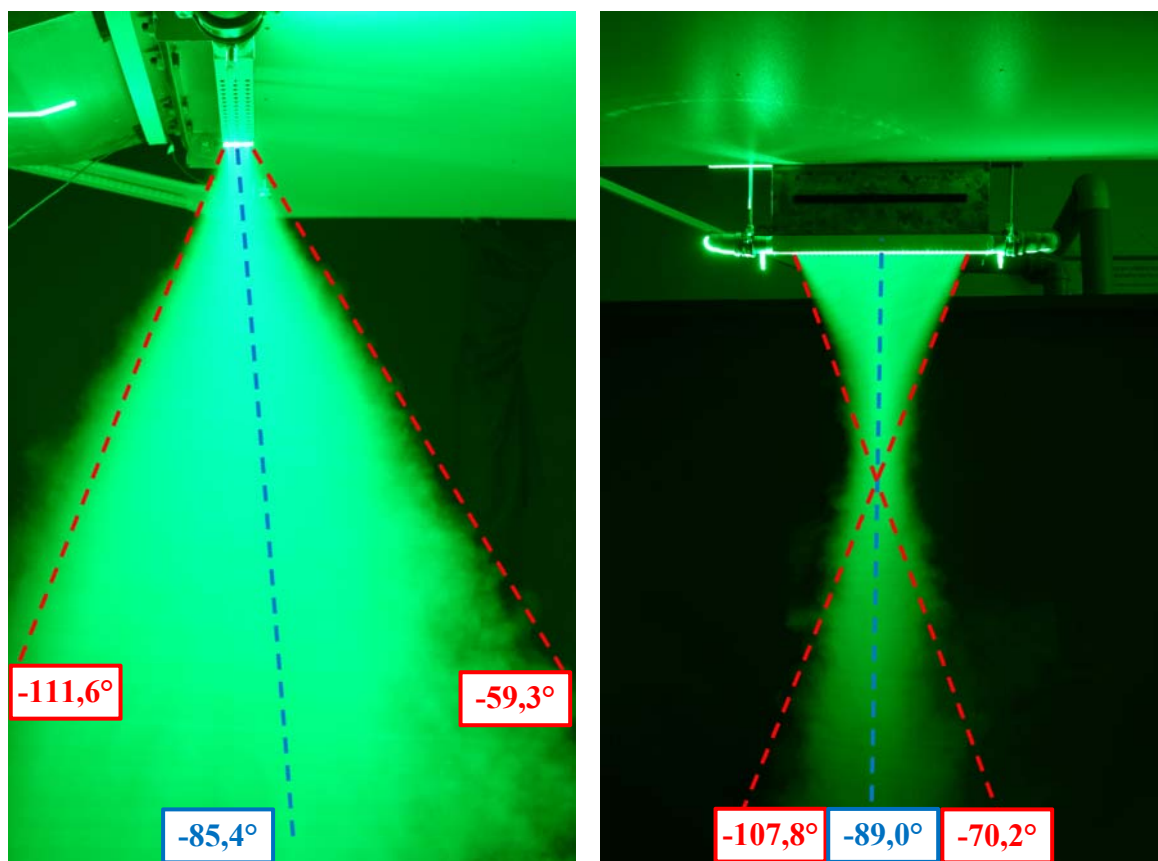


Obr. 4.1 – Vizualizace proudu vzduchu z přívodní štěrbin

Přívodní proud vzduchu z dírek v rovině kolmé na přírubu jdoucí středem příruby (obr. 4.2 vlevo) vykazuje velké průměrné rozšíření  $52,3^\circ$  způsobené krátkou trajektorií proudu (2 mm) rovným úsekem napříč materiálem základního profilu (čtvercový uzavřený profil  $30 \times 30 \times 2$  mm). Osa vystupujícího proudu je navíc skloněná o  $4,6^\circ$  k pracovnímu stolu.

V rovině rovnoběžné s přírubou jdoucí středem prostřední řady příváděcích dírek (obr. 4.2 vpravo) došlo oproti variantě se štěrbinou k výrazné změně, vzduch přiváděný do základního profilu z obou stran v tomto případě nezpůsobil zrovnoměnění proudění a nezamezil odchylování proudu do strany, ale kvůli absenci dráhy pro usměrnění proudu v požadovaném směru (pouze 2 mm v nosném materiálu základního profilu), dochází k odklonu proudu ve směru od přívodů, takže se vytvořilo proudění ve tvaru trojúhelníku. Tomuto jevu ještě více napomáhá, že jednotlivé proudy z dírek jsou k sobě navzájem přitahovány, protože si nemají v oblasti dírek odkud nasávat vzduch, přičemž na okrajích proudu dochází ke strhávání vzduchu z okolí. Celkově se však dle teorie má proud ve směru proudění rozšiřovat, a proto se (ve větší vzdálenosti) na obou snímcích (obr. 4.2) proud rozšiřuje. Osa proudu jde téměř svisle dolů.

Řešení s přívodem vzduchu dírkami je výrobně nenáročné, ale dle vizualizace při čelním pohledu nevhodné kvůli tvaru výstupního proudu, který nepokrývá celou oblast nad přírubou.



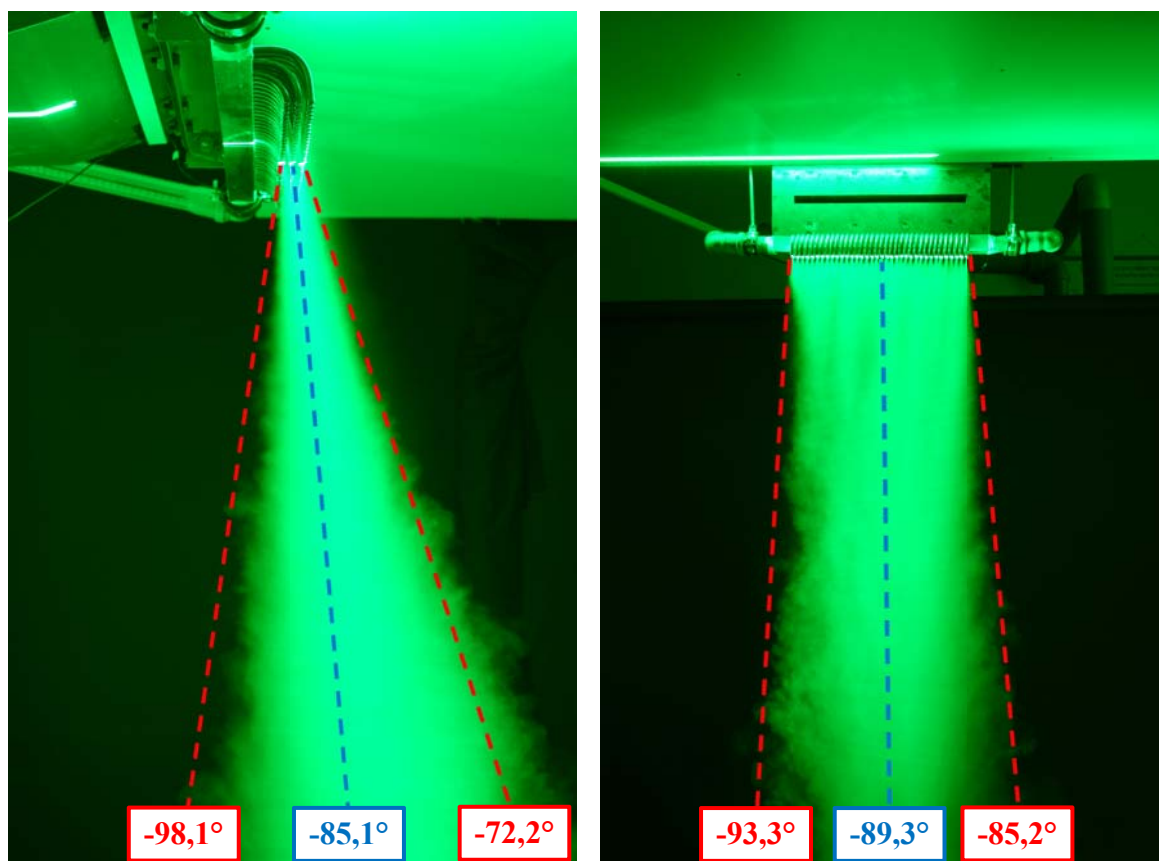
Obr. 4.2 – Vizualizace proudu vzduchu z přívodních dírek



Přívodní proud vzduchu z trubiček v rovině kolmé na přírubu jdoucí středem příruby (obr. 4.3 vlevo) má průměrné rozšíření ( $25,9^\circ$ ), menší v porovnání s přívodem vzduchu štěrbinou. Navíc se osa vystupujícího proudu průměrně sklání o  $4,9^\circ$  k pracovnímu stolu.

V rovině rovnoběžné s přírubou jdoucí středem prostřední řady příváděcích trubiček (obr. 4.3 vpravo) došlo oproti variantě se štěrbinou k narovnání proudu a v porovnání s variantou s dírkami již nedochází k tvorbě zúžení a opětovného rozšíření proudu, jelikož do prostoru mezi trubičkami se může přisávat vzduch, což brání vzájemnému přitahování proudů z jednotlivých trubiček. Také vzduch proudící trubičkami dostal na větší dráze jasný směr proudění. Proud má v této rovině průměrné rozšíření ( $8,1^\circ$ ) srovnatelné se štěrbinou ( $8,6^\circ$ ).

Řešení s přívodem vzduchu trubičkami je výrobně náročné, ale dle vizualizace při čelním pohledu má požadovaný tvar.



Obr. 4.3 – Vizualizace proudu vzduchu z přívodních trubiček

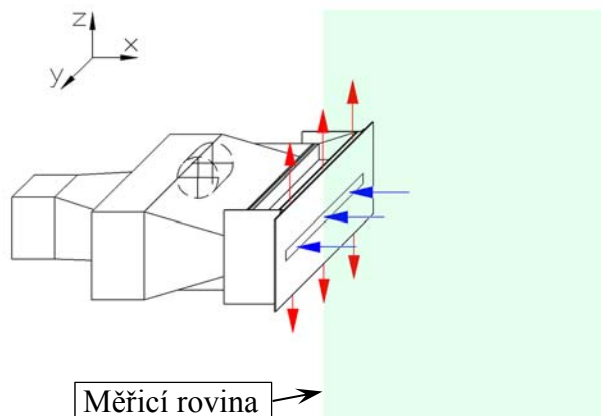
## 5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ ÚČINNOSTI ODSÁVÁNÍ ŠTĚRBINOVÉHO SACÍHO NÁSTAVCE

Výsledky měření účinnosti odsávání jsou při různých módech sacího nástavce ( $I = 0$ ;  $I = 0,3$ ;  $I = 0,6$  a  $I = 0,9$ ) zobrazeny v diagramech, ve kterých jsou vykresleny izočáry konstantní účinnosti odsávání s krokem 10 % a to v rozsahu od 50 % do 100 %. Isočáry jsou vykresleny v oblasti účinného odsávání, která je definovaná jako vzdálenost, kde účinnost odsávání poklesne pod 50 %. Diagramy jsou vytvořeny v bezrozměrných souřadnicích – poměrné vzdálenosti od odsávací štěrbiny vztažené k šířce odsávací štěrbiny  $b = 15$  mm.

Následně jsou uvedeny také grafy účinnosti odsávání v ose odsávací štěrbiny, ve kterých je zakresleno pospojování bodů (z důvodu přehlednosti bez jednotlivých bodů).

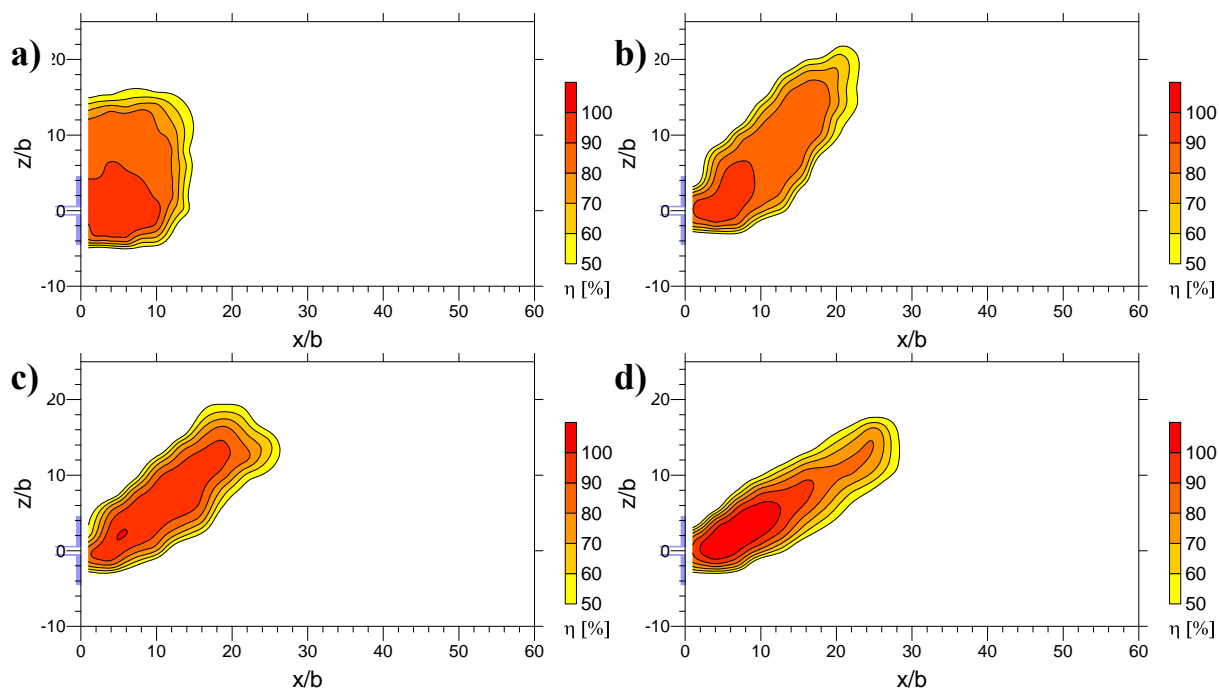
### 5.1 Výsledky účinnosti odsávání ve volném prostoru – přívod dvěma štěrbinami

Uvedené měření bylo provedeno Bouzkem (Bouzek 2004) na Energetickém ústavu, FSI, VUT v Brně se sacím nástavcem umístěným ve volném prostoru obr. 5.1. Výsledky jsou zde uvedeny z důvodu návaznosti dizertační práce na předchozí výzkumy pracoviště, pro možnost porovnání účinnosti odsávání zesíleného štěrbinového nástavce ve volném prostoru a s pracovním stolem – přepážkou.



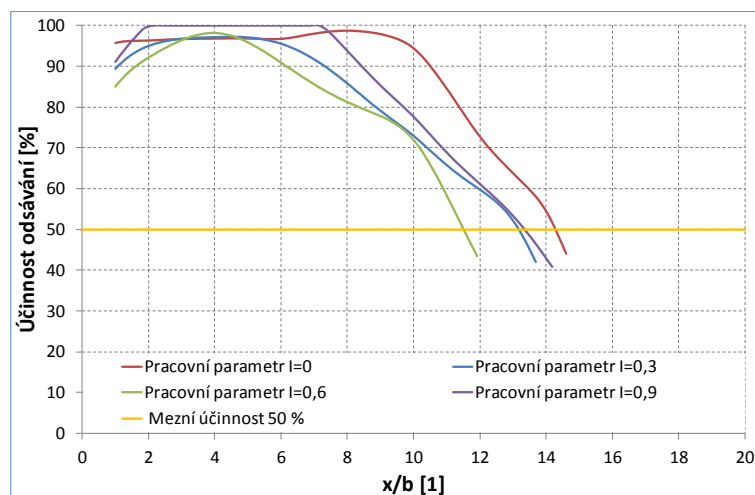
Obr. 5.1 – Zesílený štěrbinový sací nástavec umístěný  
ve volném prostoru – přívod dvěma štěrbinami

Výsledné plochy účinného odsávání při různých módech sacího nástavce ( $I = 0$ ;  $I = 0,3$ ;  $I = 0,6$  a  $I = 0,9$ ) jsou zobrazeny na obr. 5.2. Při porovnání výsledků měření lze vidět, že při odsávání s pracovním parametrem  $I = 0$  (tradiční odsávání bez zesílení) je oblast účinného odsávání širší, ale za to kratší ( $x/b = 14,9$ ) v porovnání s ostatními měřenými případy. Při zvyšování hodnoty pracovního parametru  $I$  se plocha účinného odsávání prodlužuje (pro  $I = 0,3$   $x/b = 23,0$ ;  $I = 0,6$   $x/b = 26,3$  a  $I = 0,9$   $x/b = 28,3$ ) a postupně narovnáva, ale současně dochází k zúžení této plochy. Lze také vidět značnou asymetrii oblasti účinného odsávání vůči horizontální ose sacího nástavce. Tato asymetrie je způsobena rozdílnou hustotou použitého stopového plynu  $\text{CO}_2$  a hustotou vzduchu, které jsou  $1,726 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  a  $1,135 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , při průměrné teplotě a tlaku během měření. Archimedovo číslo v tomto případě má hodnotu  $Ar = -0,0012$ , tj. stopový plyn klesá proti směru osy  $z$ .



Obr. 5.2 – Účinnost zachycení škodlivin ve vertikální rovině jdoucí osou sacího nástavce umístěného ve volném prostoru – přívod dvěma štěrbinami s pracovním parametrem: a)  $I = 0$ ; b)  $I = 0,3$ ; c)  $I = 0,6$ ; d)  $I = 0,9$  převzato a upraveno (Bouzek 2004)

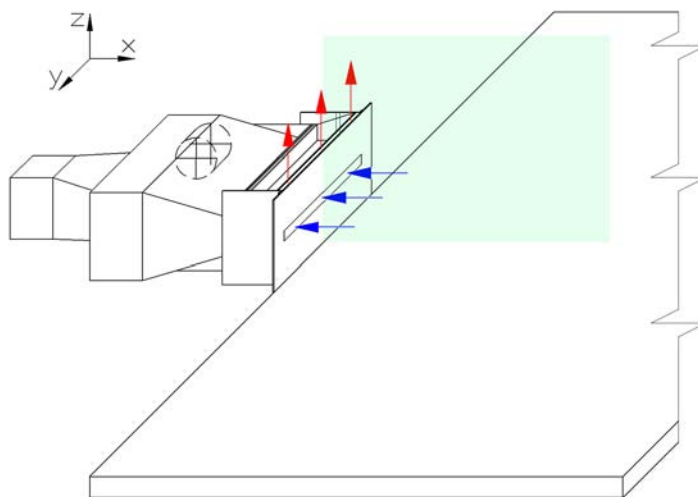
Největší dosah účinnosti odsávání v ose odsávací štěrby (obr. 5.3) má sací nástavec při pracovním parametru  $I=0$  tj. tradiční odsávání. Je to způsobeno vlivem hustoty stopového plynu (Archimedovo číslo  $-0,0012$ ), protože osa plochy účinného odsávání není totožná s osou štěrby, ale směřuje šikmo vzhůru. Proto je nutné zohlednit i celkový vzhled účinné oblasti a nejen dosah v ose štěrby. Tím jak docházelo k narovnávání účinné oblasti při zvyšování pracovního parametru  $I$  lze pozorovat že i dosah proudu v ose štěrby se prodlužoval.



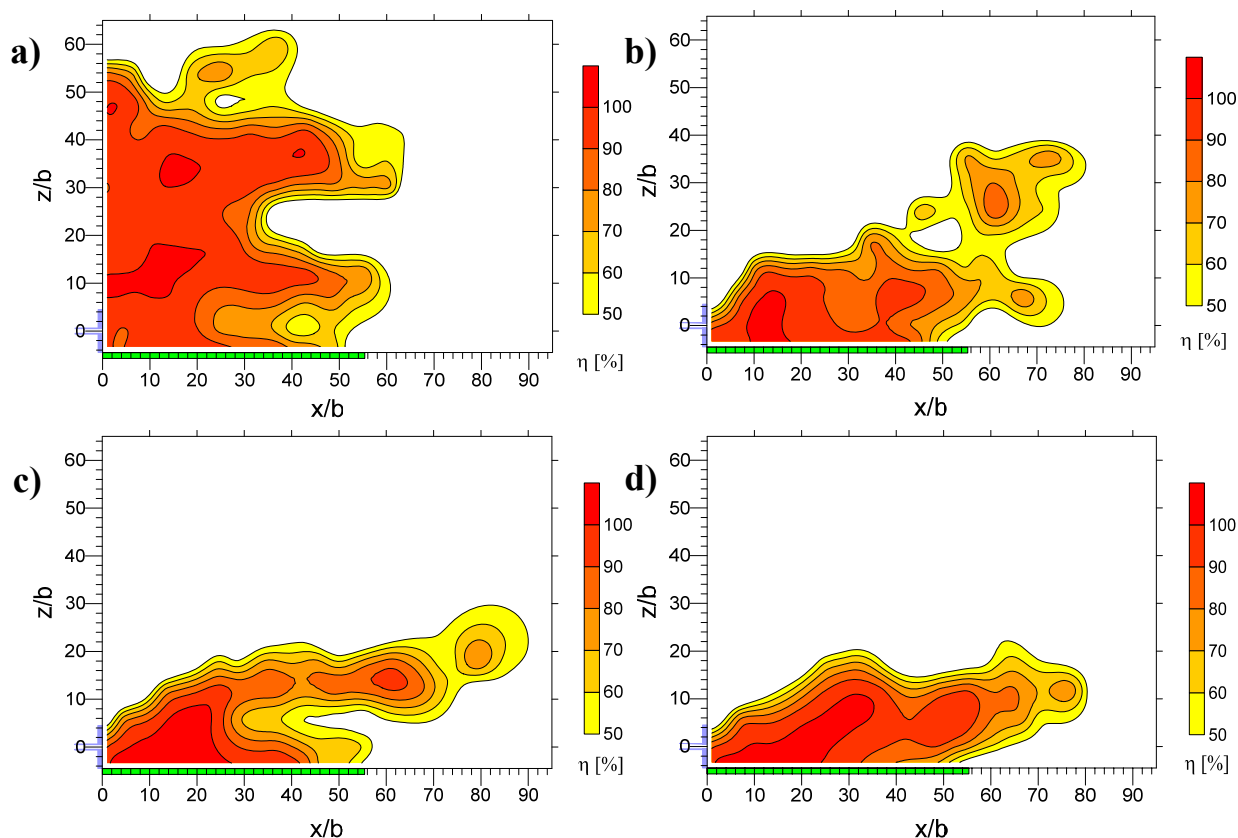
Obr. 5.3 – Porovnání účinnosti odsávání v ose odsávací štěrby ve volném prostoru – přívod dvěma štěrbinami

## 5.2 Výsledky měření účinnosti odsávání s pracovním stolem v úrovni spodní hrany příruby – přívod štěrbinou

Obr. 5.4 ilustruje použití zesíleného štěrbinového sacího nástavce v kombinaci s pracovním stolem – přepážkou umístěným v úrovni spodní hrany příruby. Výsledky měření účinnosti zachycení škodlivin pomocí stopového plynu lze vidět na obr. 5.5. Z porovnání výsledků je patrný značný rozdíl výšky plochy účinného odsávání při tradičním odsávání  $I = 0$ . Při zvyšování pracovního parametru  $I$  dochází k prodlužování oblasti vysoce účinného odsávání s 80% a vyšší účinností, ale také ke zmenšování její výšky způsobené přívodním proudem, který ve větší výšce nad pracovním stolem strhává vzduch se stopovým plynem a tím jej recirkuluje zpět do místnosti. Maximální dosah odsávání je při  $I = 0$   $x/b = 63,7$ ;  $I = 0,3$   $x/b = 80,4$ ;  $I = 0,6$   $x/b = 90,0$  a pro  $I = 0,9$   $x/b = 80,4$ . Při zvětšujícím se pracovním parametru  $I$  dochází k prodlužování celkové zachytné vzdálenosti, pouze při nastavení pracovního parametru na hodnotu  $I = 0,9$  došlo ke zkrácení účinné oblasti, ale výsledná oblast lépe odsává v pracovní oblasti, která leží v blízkosti nad deskou pracovního stolu.

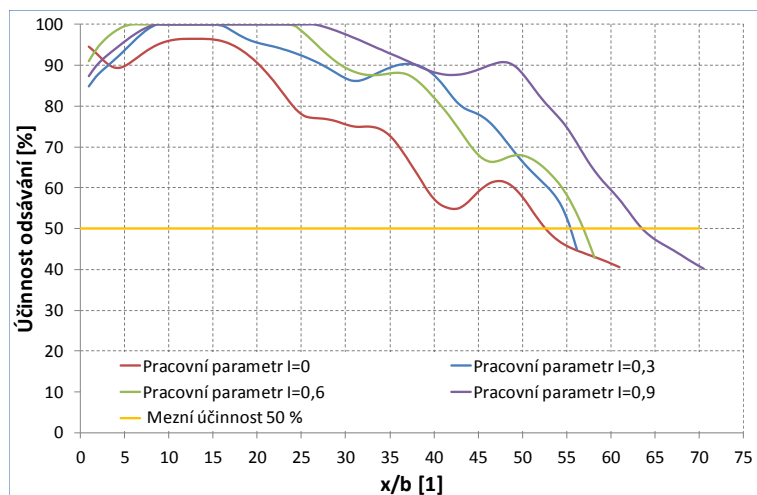


Obr. 5.4 – Zesílený štěrbinový sací nástavec s pracovním stolem – přepážkou v úrovni spodní hrany příruby – přívod štěrbinou



Obr. 5.5 – Účinnost zachycení škodlivin ve vertikální rovině jdoucí osou sacího nástavce s pracovním stolem – přepážkou v úrovni spodní hrany příruby – přívod štěrbinou s pracovním parametrem: **a)**  $I = 0$ ; **b)**  $I = 0,3$ ; **c)**  $I = 0,6$ ; **d)**  $I = 0,9$

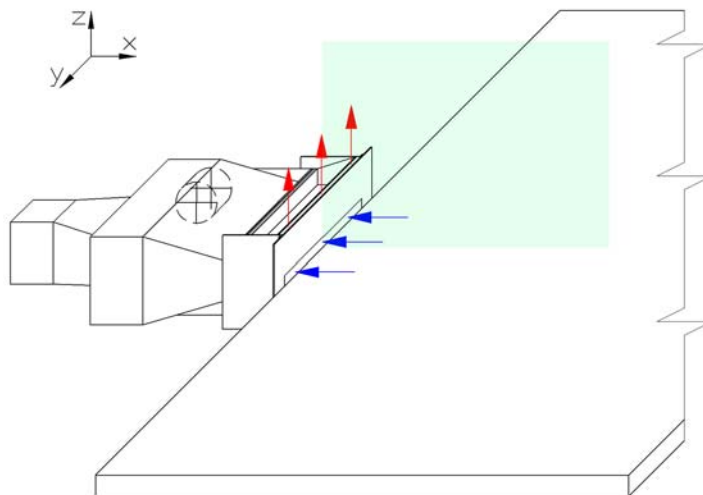
Při porovnání dosahu účinnosti odsávání (větší než 50 %) v ose odsávací štěrbiny (obr. 5.6) se při zvyšování pracovního parametru  $I$  prodlužuje zachytná vzdálenost. Také lze pozorovat zvýšení účinnosti odsávání při zesíleném odsávání v celém rozsahu vzdálenosti účinného odsávání v ose štěrbiny, oproti tradičnímu odsávání, kdy se oblast vysoce účinného odsávání (s 80% a vyšší účinností) prodloužila o 70–120 %. Avšak v ose sacího nástavce se nevyskytuje nejdelší zachytná vzdálenost, ta je posunutá do větší výšky nad pracovním stolem (osa  $z/b$ ) viz obr. 5.5. To je způsobeno větší hustotou (Archimedovo číslo  $-0,0012$ ) stopového plynu, kdy stopový plyn klesá dolů a je zachycen prouděním k sacímu nástavci a část je zastavena pracovním stolem – přepážkou, ze kterého je následně odsán.



Obr. 5.6 – Porovnání účinnosti odsávání v ose odsávací štěrbiný s pracovním stolem – přepážkou v úrovni spodní hrany příruby – přívod štěrbinou

### 5.3 Výsledky měření účinnosti odsávání s pracovním stolem v úrovni spodní hrany odsávací štěrbiný – přívod štěrbinou

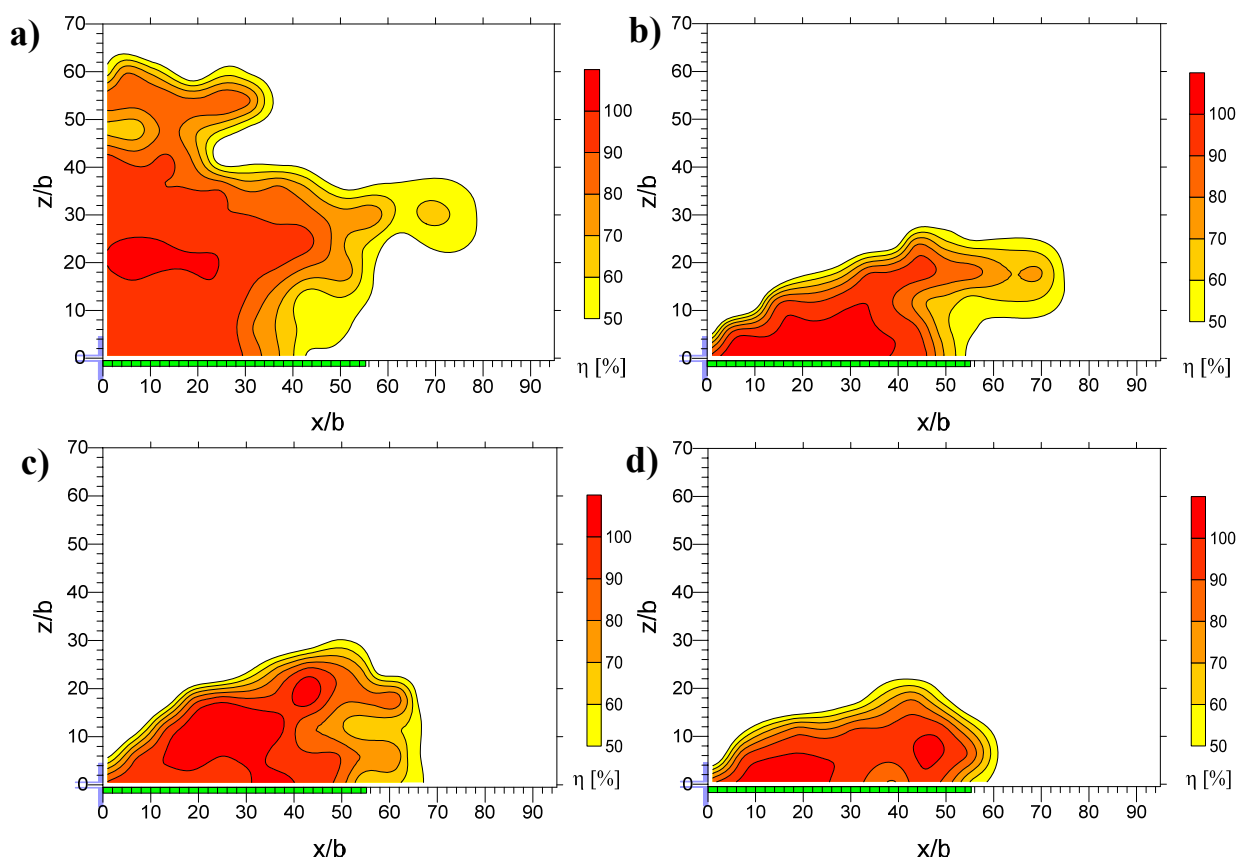
V případě umístění pracovního stolu – přepážky v úrovni spodní hrany odsávací štěrbiný (obr. 5.7) jsou výsledky viz obr. 5.8 podobné jako v minulém případě, s tím rozdílem, že plochy účinného odsávání mají celistvější tvar a oblasti vysoce účinného odsávání s 80% a vyšší účinností se ještě více prodloužily. Maximální dosah odsávání je při  $I = 0$   $x/b = 78,6$ ;  $I = 0,3$   $x/b = 74,9$ ;  $I = 0,6$   $x/b = 67,2$  a pro  $I = 0,9$   $x/b = 60,9$ . Při zvětšujícím se pracovním parametru  $I$  sice dochází ke zkracování celkové zachytné vzdálenosti ale zvyšuje se účinnost v pracovní oblasti.



Obr. 5.7 – Zesílený štěrbinový sací nástavec s pracovním stolem – přepážkou v úrovni spodní hrany odsávací štěrbiný – přívod štěrbinou

Při porovnání všech tří konfigurací umístění zesíleného sacího nástavce lze vidět, že oblast účinného odsávání v případě umístění sacího nástavce ve volném prostoru je značně menší oproti případům se stolem. Tento rozdíl je způsoben zejména rozdílnou hustotou stopového plynu ( $\text{CO}_2$ ) a vzduchu (Archimédovo číslo  $-0,0012$ ), kdy v případě s pracovním stolem – přepážkou je klesající stopový plyn částečně odsán a částečně je zachycen pracovním

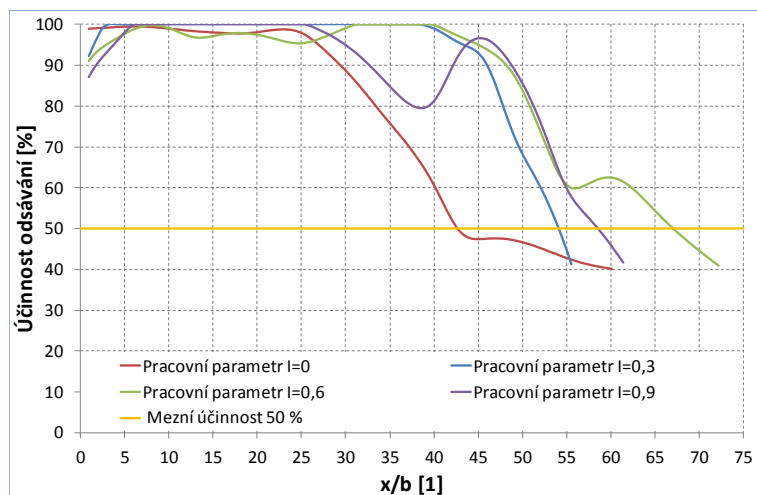
stolem – přepážkou, ze kterého je následně odsán. Se zvětšující se vzdáleností měřicích bodů od sacího nástavce (osa  $x/b$ ) a od pracovního stolu (osa  $z/b$ ) již není všechen stopový plyn odsán, protože může být vyvinutým prouděním v místnosti odnesen mimo stůl.



Obr. 5.8 – Účinnost zachycení škodlivin ve vertikální rovině jdoucí osou sacího nástavce s pracovním stolem – přepážkou v úrovni spodní hrany odsávací štěrbinou – přívod štěrbinou s pracovním parametrem: **a)**  $I = 0$ ; **b)**  $I = 0,3$ ; **c)**  $I = 0,6$ ; **d)**  $I = 0,9$

U účinnosti zachycení v ose odsávací štěrbinou obr. 5.9 došlo k značnému zkrácení účinné oblasti při nastavení s pracovním parametrem  $I = 0$  a  $0,9$ , u varianty s  $I = 0,3$  došlo jen k minimálnímu zkrácení. Naopak při nastavení pracovního parametru na hodnotu  $I = 0,6$  došlo oproti předchozí konfiguraci k značnému prodloužení. Navíc došlo k dalšímu prodloužení oblasti vysoce účinného odsávání (s 80% a vyšší účinností) u všech nastavení pracovního parametru i když u nastavení  $I = 0,9$  se v této oblasti objevil jeden propad účinnosti. Zlepšení bylo dosaženo lepším odsáváním z desky pracovního stolu, která je v této konfiguraci v úrovni odsávací štěrbinou.

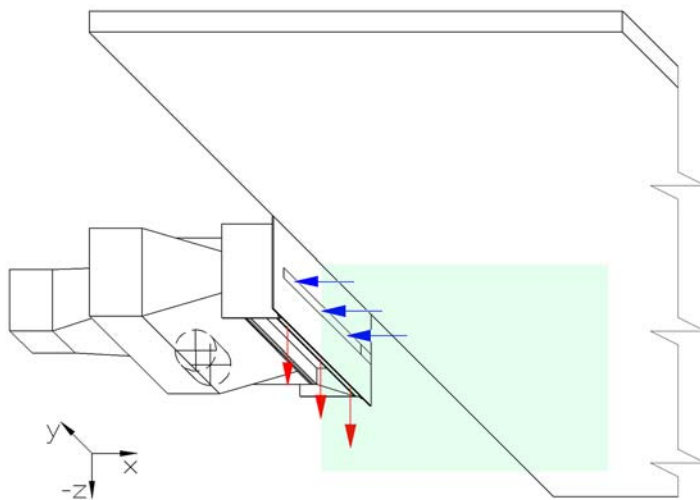




Obr. 5.9 – Porovnání účinnosti odsávání v ose odsávací štěrbinou s pracovním stolem – přepážkou v úrovni spodní hrany odsávací štěrbinou – přívod štěrbinou

## 5.4 Výsledky měření účinnosti odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany příruby – přívod štěrbinou

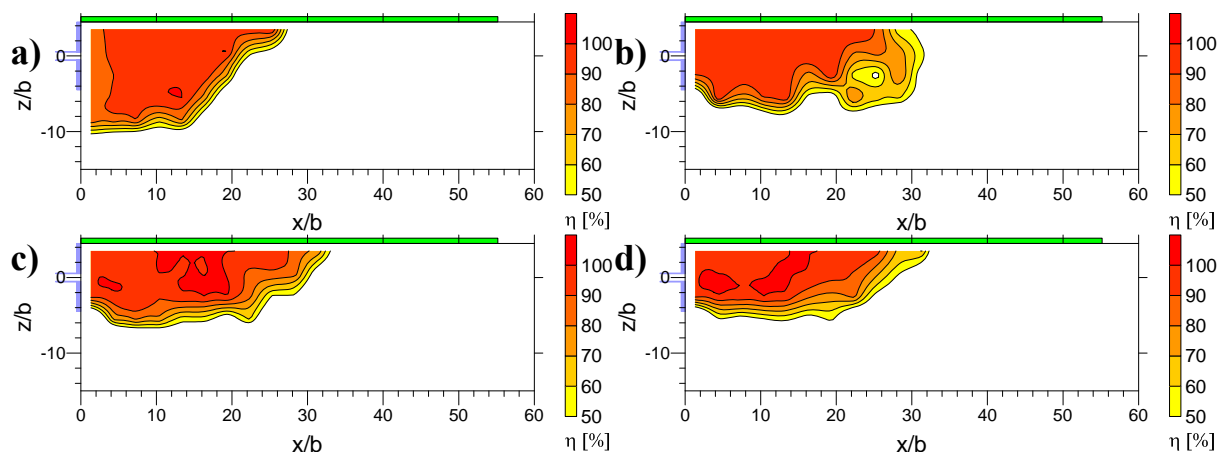
Při použití konfigurace 4. (z tab. 3.1 na str. 41) se zesíleným sacím nástavcem s přívodem vzduchu štěrbinou a s přepážkou v úrovni horní hrany příruby obr. 5.10 bylo využito záporného Archimedova čísla použitého stopového plynu a přepážka byla přesunuta nad odsávací štěrbinou. Toto uspořádání modeluje pracovní stůl se, škodlivinou lehčí než vzduch (s kladným Archimedovým číslem). Toho je využito také v následujících konfiguracích.



Obr. 5.10 – Zesílený štěrbinový sací nástavec s přepážkou v úrovni horní hrany příruby – přívod štěrbinou

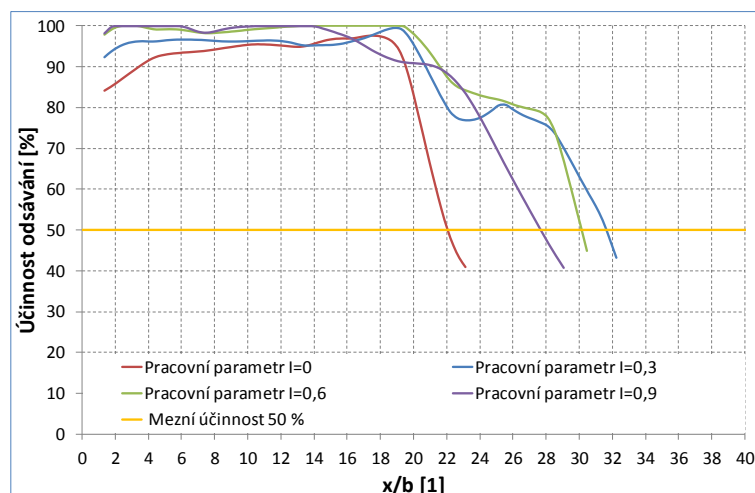


Z výsledků (obr. 5.11) je patrné, že se díky poloze přepážky nad odsávací štěrbinou výška účinné oblasti podstatně zmenšila a také došlo k jejímu zkrácení v porovnání s konfigurací s přepážkou pod sacím nástavcem. Dále je možné vidět, že oblast účinného odsávání při tradičním odsávání ( $I = 0$ ) dosahuje větší vzdálenosti od přepážky (ve směru  $-z$ ), protože neobsahuje žádný přívodní proud, který by v této oblasti mohl stopový plyn strhnout a recirkulovat do místnosti. Ale při použití zesíleného odsávání ( $I = 0,3$ ;  $0,6$  a  $0,9$ ) došlo k prodloužení účinné oblasti. Maximální dosah odsávání je při  $I = 0$   $x/b = 27,4$ ;  $I = 0,3$   $x/b = 31,6$ ;  $I = 0,6$   $x/b = 33,1$  a pro  $I = 0,9$   $x/b = 32,3$ .



Obr. 5.11 – Účinnost zachycení škodlivin ve vertikální rovině jdoucí osou sacího nástavce s přepážkou v úrovni horní hrany příruby – přívod štěrbinou s pracovním parametrem:  
a)  $I = 0$ ; b)  $I = 0,3$ ; c)  $I = 0,6$ ; d)  $I = 0,9$

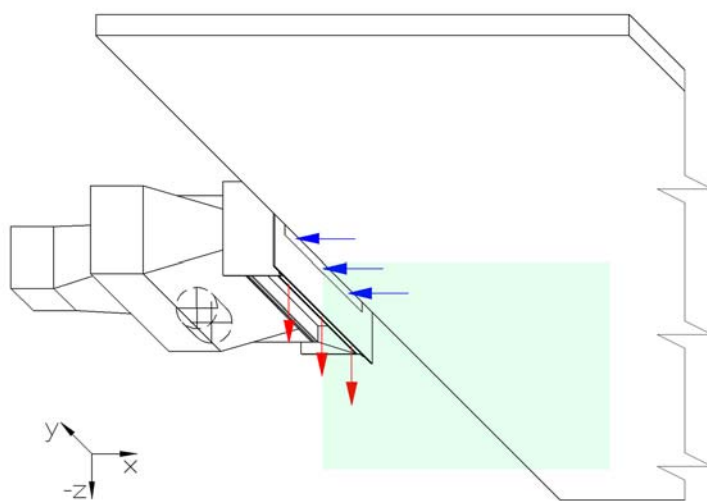
Z obr. 5.12 lze získat informaci o dosahu oblasti účinného odsávání v ose odsávací štěrbin, kdy při zvyšování pracovního parametru  $I$  došlo ke zvýšení účinnosti odsávání v celé délce v porovnání s tradičním odsáváním. Navíc došlo k prodloužení účinné oblasti ve všech zesílených variantách. Avšak při zvyšování pracovního parametru nad hodnotu  $I = 0,3$  již nedošlo k očekávanému dalšímu prodloužení účinné oblasti ale naopak k jejímu zkrácení.



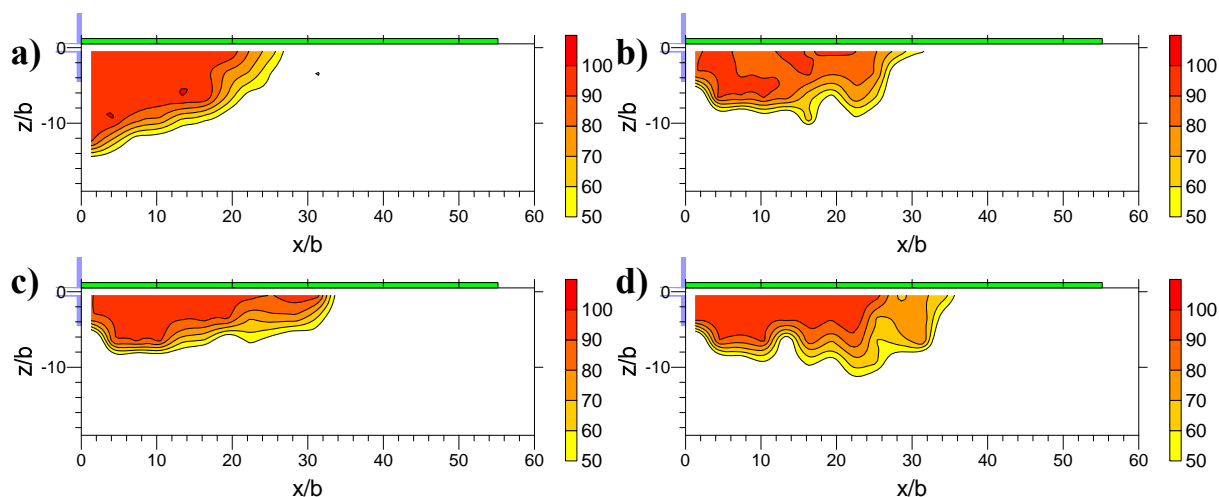
Obr. 5.12 – Porovnání účinnosti odsávání v ose odsávací štěrbin s přepážkou v úrovni horní hrany příruby – přívod štěrbinou

## 5.5 Výsledky měření účinnosti odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbinou – přívod štěrbinou

Při použití konfigurace 5. (z tab. 3.1 na str. 41) se zesíleným sacím nástavcem s přívodem vzduchu štěrbinou a s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbinou obr. 5.13 lze z výsledků měření účinnosti odsávání obr. 5.14 vidět předpokládané prodlužování účinné oblasti při zvětšování pracovního parametru  $I$  a dále zmenšování oblasti ve směru osy  $-z$ . V porovnání s předchozí konfigurací se účinná oblast mírně prodloužila díky poloze přepážky v úrovni odsávací štěrbinou, kdy došlo k přilnutí odsávaného proudu k přepážce. Maximální dosah odsávání je při  $I = 0$   $x/b = 26,8$ ;  $I = 0,3$   $x/b = 31,6$ ;  $I = 0,6$   $x/b = 33,6$  a pro  $I = 0,9$   $x/b = 35,6$ .



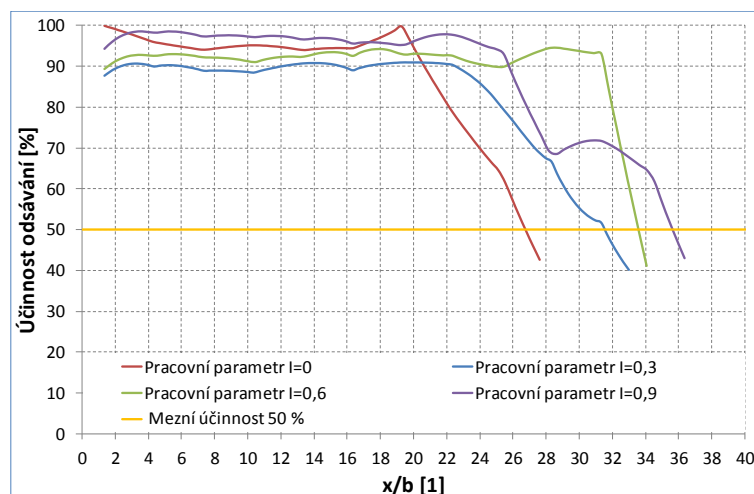
Obr. 5.13 – Zesílený štěrbinový sací nástavec s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbinou – přívod štěrbinou



Obr. 5.14 – Účinnost zachycení škodlivin ve vertikální rovině jdoucí osou sacího nástavce s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbinou – přívod štěrbinou s pracovním parametrem: a)  $I = 0$ ; b)  $I = 0,3$ ; c)  $I = 0,6$ ; d)  $I = 0,9$

Porovnáním účinnosti odsávání v ose odsávací štěrbinou při jednotlivých nastaveních pracovního parametru (obr. 5.15) lze pozorovat prodlužování účinné oblasti při zvětšování pracovního parametru. Oblast vysoce účinného odsávání s 80% a vyšší účinností se nejvíce

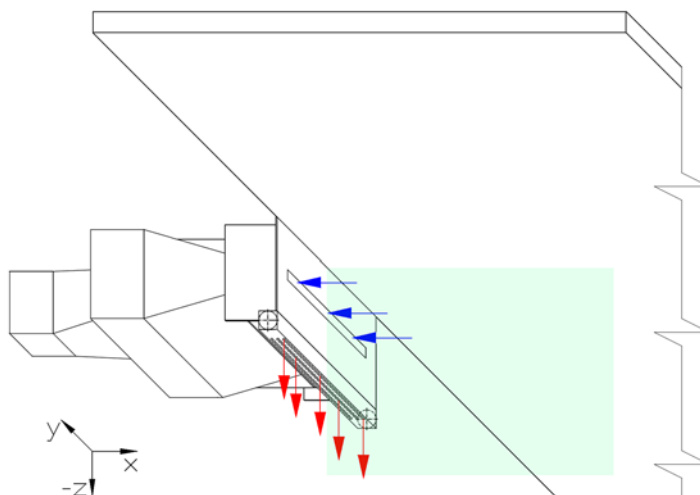
prodloužila při nastavení pracovního parametru na hodnotu  $I=0,6$ , při použití většího pracovního parametru ( $I=0,9$ ) došlo k poklesu účinnosti blíž k odsávacímu nástavci. V průběhu vysoce účinného odsávání tradičního odsávání ( $I=0$ ) dosahoval na většině této vzdálenosti nejvyšší účinnosti zesílený sací nástavec s pracovním parametrem  $I=0,9$ .



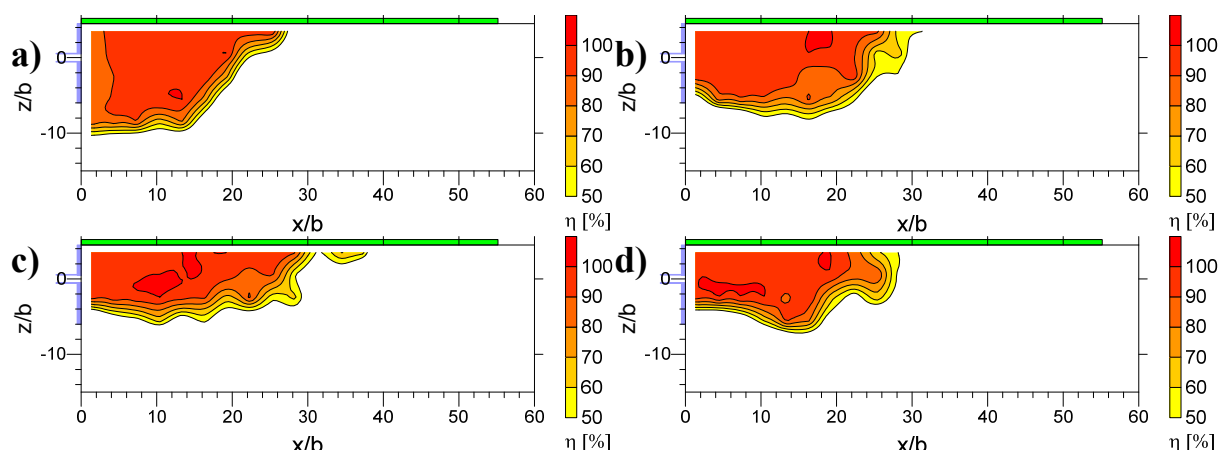
Obr. 5.15 – Porovnání účinnosti odsávání v ose odsávací štěrbinou s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbinou – přívod štěrbinou

## 5.6 Výsledky měření účinnosti odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany příruby – přívod dírkami

Po změně typu přívodu vzduchu dírkami obr. 5.16 místo přívodní štěrbinou a v konfiguraci s přepážkou v úrovni horní hrany příruby (konfigurace 6. z tab. 3.1 na str. 41) lze pozorovat, že při zesíleném odsávání došlo k prodloužení účinné oblasti obr. 5.17. Při zvětšování pracovního parametru z  $I=0,3$  až na  $I=0,9$  nedošlo k předpokládanému prodloužení oblasti účinného odsávání, pouze při nastavení  $I=0,6$  se v blízkosti stolu pouze v malé oblasti prodloužila oblast účinného odsávání. Maximální dosah odsávání je při  $I=0$   $x/b=27,4$ ;  $I=0,3$   $x/b=31,4$ ;  $I=0,6$   $x/b=37,9$  a pro  $I=0,9$   $x/b=28,3$ .

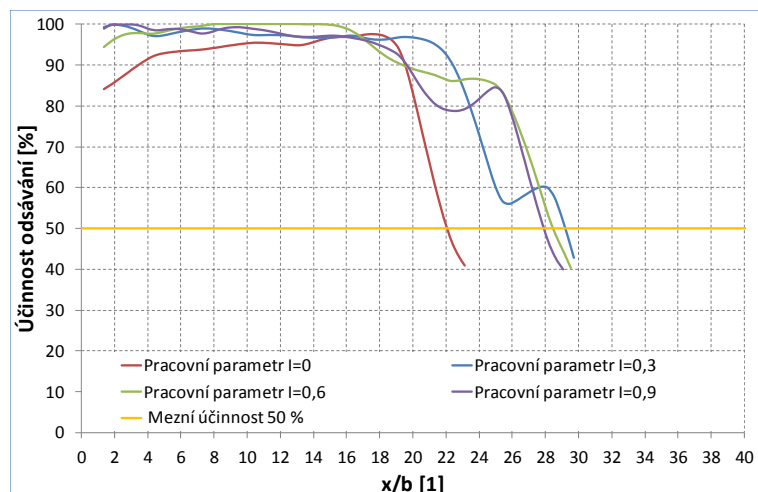


Obr. 5.16 – Zesílený štěrbinový sací nástavec s přepážkou v úrovni horní hrany příruby – přívod dírkami



Obr. 5.17 – Účinnost zachycení škodlivin ve vertikální rovině jdoucí osou sacího nástavce s přepážkou v úrovni horní hrany příruby – přívod dírkami s pracovním parametrem:  
a)  $I = 0$ ; b)  $I = 0,3$ ; c)  $I = 0,6$ ; d)  $I = 0,9$

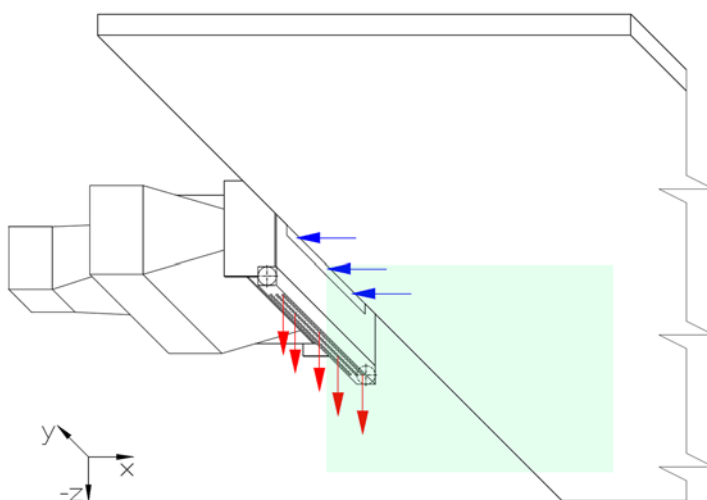
Z porovnání odsávání v ose odsávací štěrby při jednotlivých nastaveních pracovního parametru obr. 5.18 lze pozorovat již dříve popisované chování, kdy při zvětšování pracovního parametru nedošlo v ose odsávací štěrby k prodloužení účinné oblasti vůči nastavení  $I = 0,3$ , ale naopak k jejímu zkrácení. Zvětšený pracovní parametr (nad  $I = 0,3$ ) se ale projevil na délce oblasti vysoce účinného odsávání s 80% a vyšší účinností, kdy při zvětšení pracovního parametru na  $I = 0,6$  sice došlo k dřívějšímu pomalému poklesu účinnosti odsávání ale také k prodloužení této oblasti. Při nastavení na  $I = 0,9$  došlo k rychlejšímu poklesu až na hranici kolem 80 % ale ve větší vzdálenosti došlo ještě k zvýšení účinnosti odsávání po které již následoval plynulý pokles účinnosti.



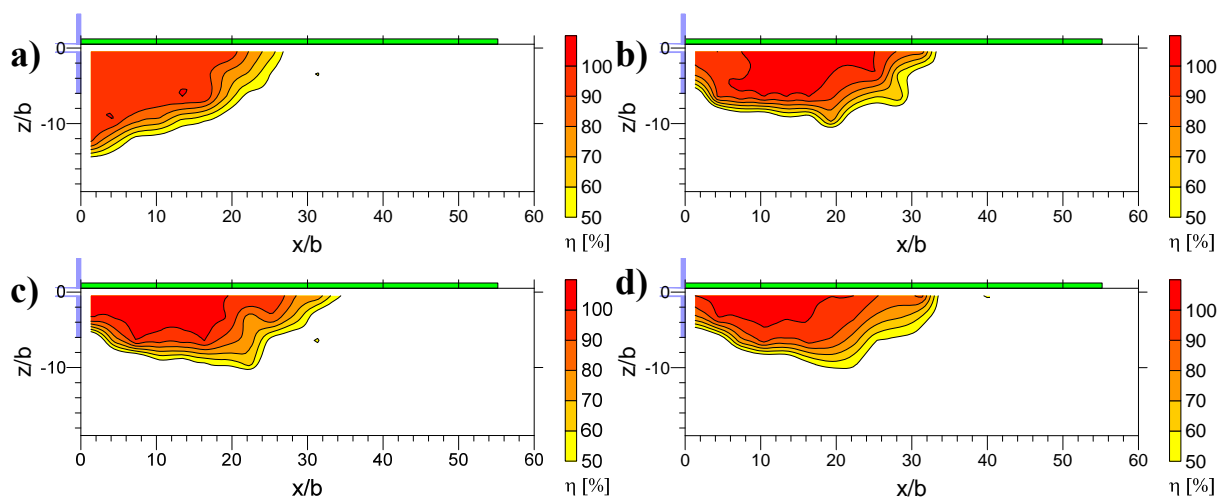
Obr. 5.18 – Porovnání účinnosti odsávání v ose odsávací štěrby s přepážkou v úrovni horní hrany příruby – přívod dírkami

## 5.7 Výsledky měření účinnosti odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby – přívod dírkami

V případě umístění přepážky v úrovni horní hrany odsávací štěrby a přívodu vzduchu dírkami (obr. 5.19) je oblast účinného odsávání (obr. 5.20) celistvější a došlo k celkovému prodloužení účinných oblastí. Kdy při zvětšování pracovního parametru nad  $I = 0,3$  došlo již jen k minimálnímu prodloužení účinné oblasti. Maximální dosah odsávání je při  $I = 0$   $x/b = 26,8$ ;  $I = 0,3$   $x/b = 33,2$ ;  $I = 0,6$   $x/b = 34,5$  a pro  $I = 0,9$   $x/b = 33,5$ .



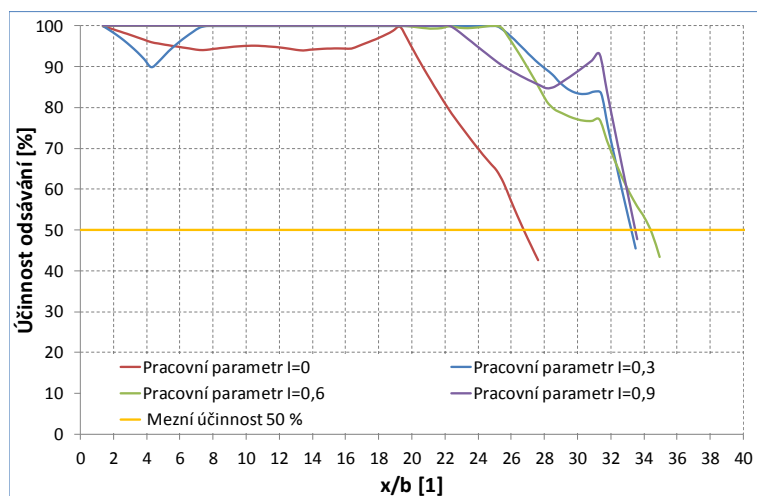
Obr. 5.19 – Zesílený štěrbinový sací nástavec s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby – přívod dírkami



Obr. 5.20 – Účinnost zachycení škodlivin ve vertikální rovině jdoucí osou sacího nástavce s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby – přívod dírkami s pracovním parametrem: **a)**  $I = 0$ ; **b)**  $I = 0,3$ ; **c)**  $I = 0,6$ ; **d)**  $I = 0,9$

Při porovnání účinnosti v ose odsávací štěrby (obr. 5.21) došlo již při zesíleném odsávání s pracovním parametrem  $I = 0,3$  ke značnému prodloužení oblasti účinného odsávání. Při dalším zvětšování pracovního parametru se účinná oblast již výrazně neprodloužila. Oblasti vysoce účinného odsávání s 80% a vyšší účinností se také značně prodloužily kdy u všech

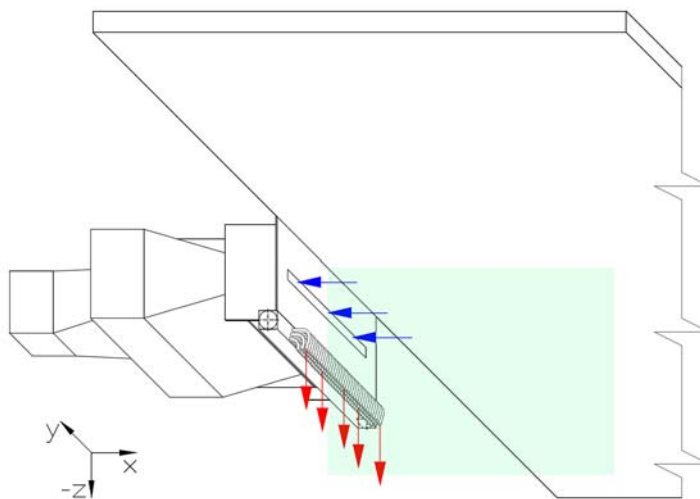
variant došlo na konci vysoce účinné oblasti k prudkému poklesu účinnosti oproti tradičnímu odsávání, kdy byl pokles účinnosti pozvolnější.



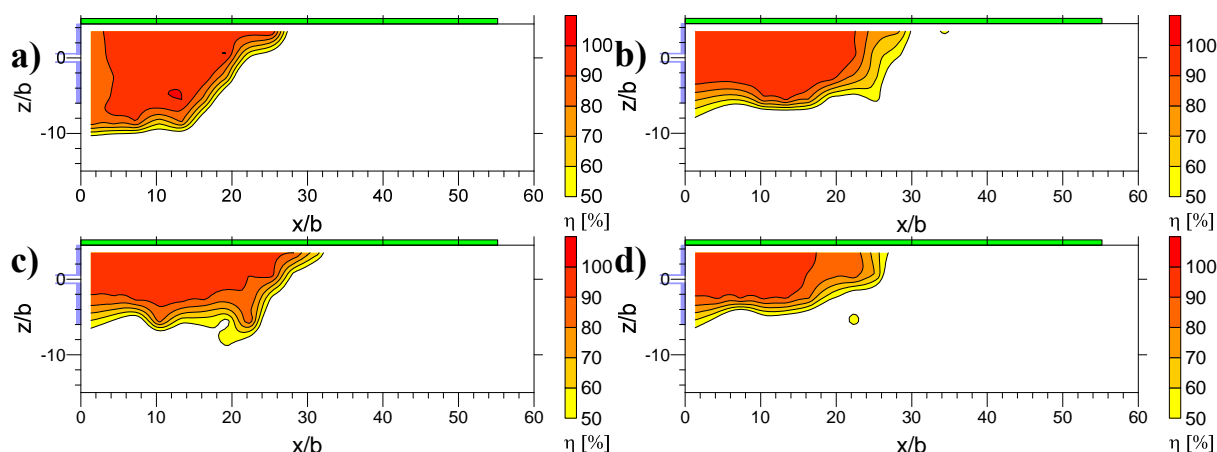
Obr. 5.21 – Porovnání účinnosti odsávání v ose odsávací štěrbině s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbině – přívod dírkami

## 5.8 Výsledky měření účinnosti odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany příruby – přívod trubičkami

Poslední typ přívodu vzduchu je pomocí trubiček obr. 5.22 místo přívodní štěrbině a v konfiguraci s přepážkou v úrovni horní hrany příruby (konfigurace 8. z tab. 3.1 na str. 41) lze pozorovat, že při zesíleném odsávání došlo k prodloužení účinné oblasti odsávání obr. 5.23 oproti tradičnímu sacímu nástavci. Při zvětšení pracovního parametru z  $I = 0,6$  na  $I = 0,9$  došlo ke zkrácení oblasti účinného odsávání. Maximální dosah odsávání je při  $I = 0$   $x/b = 27,4$ ;  $I = 0,3$   $x/b = 29,9$ ;  $I = 0,6$   $x/b = 32,2$  a pro  $I = 0,9$   $x/b = 26,9$ .

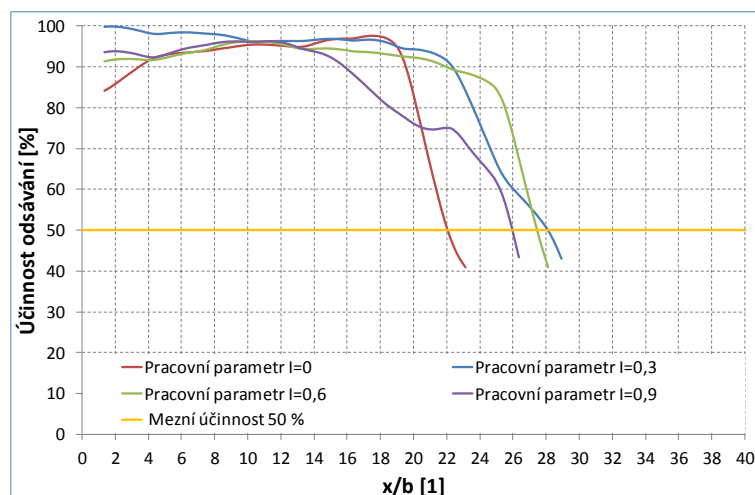


Obr. 5.22 – Zesílený štěrbinový sací nástavec s přepážkou v úrovni horní hrany příruby – přívod trubičkami



Obr. 5.23 – Účinnost zachycení škodlivin ve vertikální rovině jdoucí osou sacího nástavce s přepážkou v úrovni horní hrany příruby – přívod trubičkami s pracovním parametrem:  
 a)  $I = 0$ ; b)  $I = 0,3$ ; c)  $I = 0,6$ ; d)  $I = 0,9$

Z porovnání odsávání v ose odsávací štěrby při jednotlivých nastaveních pracovního parametru obr. 5.24 lze pozorovat již dříve popsané chování, kdy při zvětšování pracovního parametru nedošlo v ose odsávací štěrby k prodloužení odsávané oblasti, ale naopak vůči nastavení  $I = 0,3$  dokonce k jejímu zkrácení. Zesílené odsávání se ale projevilo na značném prodloužení oblasti vysoce účinného odsávání s 80% a vyšší účinností při nastavení pracovního parametru  $I = 0,3$  a  $I = 0,6$ . Při nastavení pracovního parametru na hodnotu  $I = 0,9$  došlo k poklesu účinnosti pod 80 % dříve než v případě tradičního odsávání. Celková délka účinné oblasti v ose odsávací štěrby byla ale nakonec při  $I = 0,9$  delší než při tradičním odsávání.

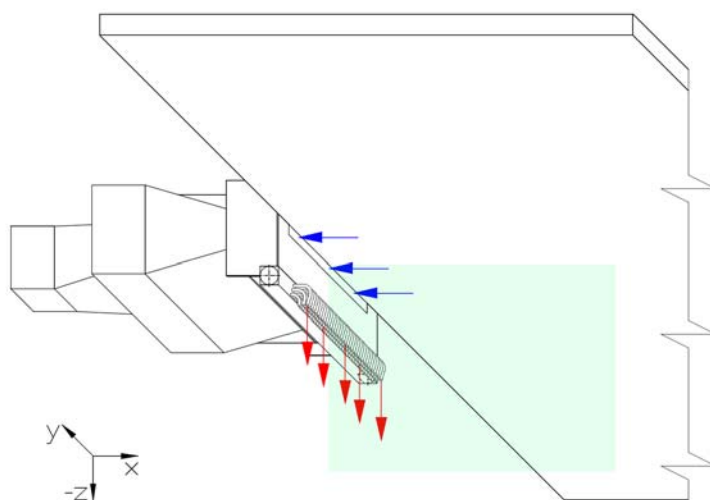


Obr. 5.24 – Porovnání účinnosti odsávání v ose odsávací štěrby s přepážkou v úrovni horní hrany příruby – přívod trubičkami

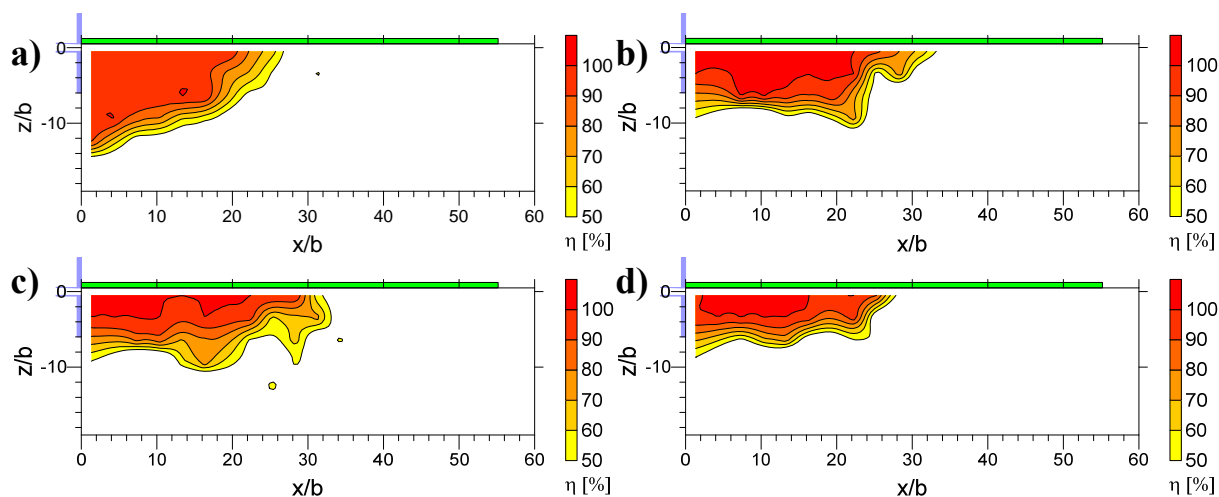


## 5.9 Výsledky měření účinnosti odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby – přívod trubičkami

Při umístění přepážky do úrovně horní hrany odsávací štěrby a přívodu vzduchu trubičkami (obr. 5.25) došlo k mírnému prodloužení oblasti účinného odsávání (obr. 5.26) oproti předchozí konfiguraci. Kdy zvětšováním pracovního parametru nad  $I = 0,3$  dochází ke zkracování účinných oblastí. Nejzřetelnější je to u nastavení pracovního parametru na hodnotu  $I = 0,9$ , kdy je plocha účinného odsávání téměř stejně dlouhá jako při tradičním odsávání, ale s vyšší účinností odsávání. Maximální dosah odsávání je při  $I = 0$   $x/b = 26,8$ ;  $I = 0,3$   $x/b = 33,3$ ;  $I = 0,6$   $x/b = 33,1$  a pro  $I = 0,9$   $x/b = 27,9$ .



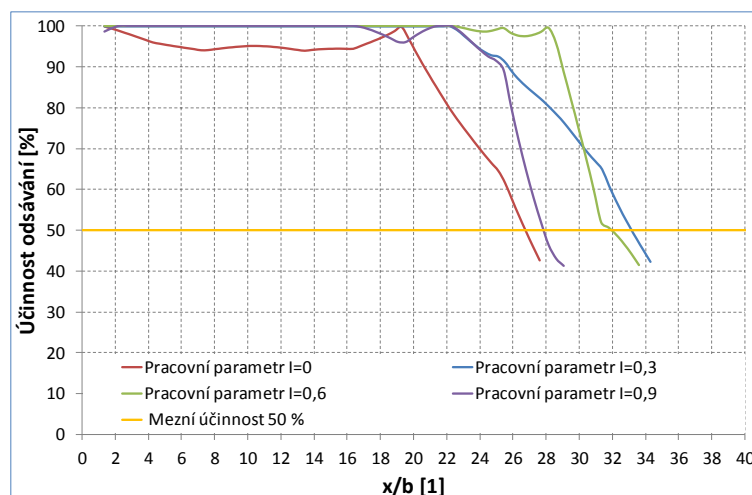
Obr. 5.25 – Zesílený štěrbinový sací nástavec s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby – přívod trubičkami



Obr. 5.26 – Účinnost zachycení škodlivin ve vertikální rovině jdoucí osou sacího nástavce s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby – přívod trubičkami s pracovním parametrem: a)  $I = 0$ ; b)  $I = 0,3$ ; c)  $I = 0,6$ ; d)  $I = 0,9$



Oblast účinného odsávání v ose odsávací štěrby (obr. 5.27) se nejvíce prodloužila při zesíleném odsávání s pracovním parametrem  $I = 0,3$ . Při dalším zvětšování pracovního parametru se účinná oblast již zkracovala. Oblasti vysoce účinného odsávání s 80% a vyšší účinností se také značně prodloužily, nejlepších výsledků bylo dosaženo při pracovním parametru  $I = 0,6$ . Při tomto nastavení byla celková délka účinné oblasti o trochu kratší, ale oblast vysoce účinného odsávání byla delší.

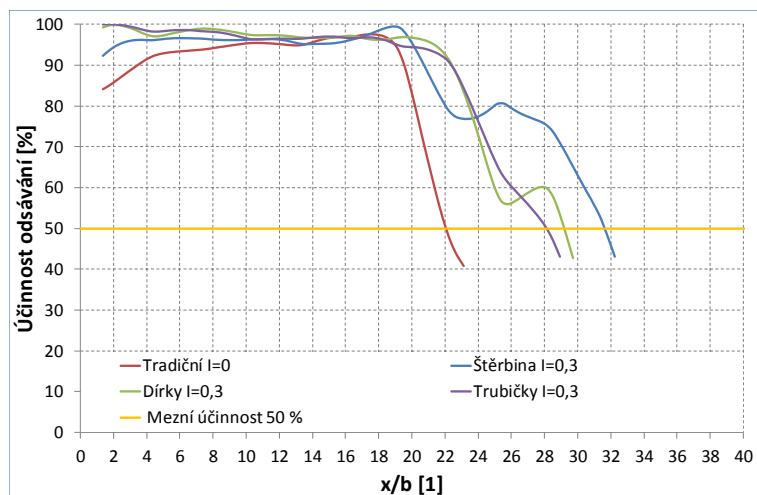


Obr. 5.27 – Porovnání účinnosti odsávání v ose odsávací štěrby s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby – přívod trubičkami

## 5.10 Porovnání účinnosti odsávání v ose odsávací štěrby s přepážkou v úrovni horní hrany příruby

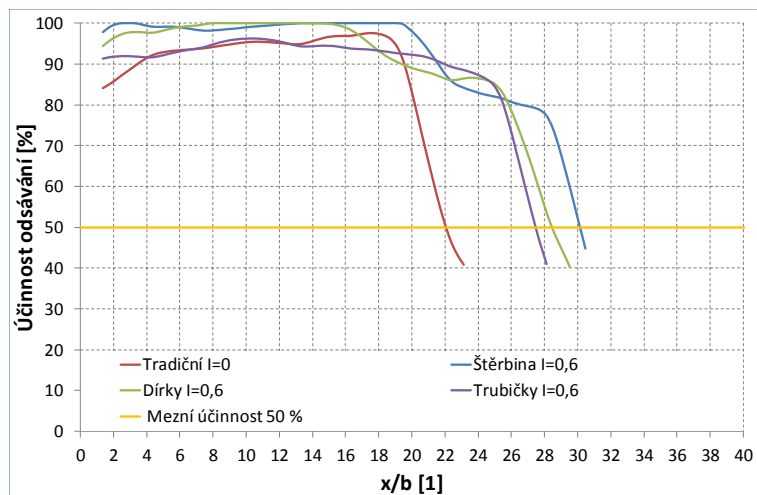
Výsledky porovnání účinnosti odsávání v ose odsávací štěrby tradičního a zesíleného štěrbinového sacího nástavce v konfiguraci s přepážkou v úrovni horní hrany příruby, při použití jednotlivých typů přívodu vzduchu (štěrbinou, dírkami, trubičkami) a pro pracovní parametry  $I = 0,3$ ;  $0,6$  a  $0,9$  lze nalézt v obr. 5.28, obr. 5.29 a obr. 5.30.

Při nastavení pracovního parametru na hodnotu  $I = 0,3$  lze pozorovat větší účinnosti odsávání oproti tradičnímu sacímu nástavci u všech použitých variant zesíleného odsávání. U všech variant zesíleného odsávání došlo také k prodloužení oblasti vysoce účinného odsávání s 80% a vyšší účinností z  $x/b = 20,2$  u tradičního odsávání na  $x/b = 22,1$  (resp.  $x/b = 25,9$ ) u přívodu štěrbinou, u přívodu dírkami  $x/b = 23,4$  a při použití trubiček pro přívod vzduchu  $x/b = 23,7$ . Oblast účinného odsávání v ose odsávací štěrby se prodloužila z  $x/b = 22,1$  u tradičního odsávání na  $x/b = 28,1$  při použití trubiček,  $x/b = 29,2$ ; při využití dírek a  $x/b = 31,6$  při použití štěrby pro přívod vzduchu.



Obr. 5.28 – Porovnání účinnosti odsávání v ose odsávací štěrby s přepážkou v úrovni horní hrany příruby s pracovním parametrem  $I = 0$  a  $0,3$

Nastavením pracovního parametru na hodnotu  $I = 0,6$  se při přívodu vzduchu štěrbinou a dírkami zvýšila účinnost odsávání v oblasti vysoce účinného odsávání. Oproti tradičnímu odsávání ( $x/b = 20,2$ ) se oblast vysoce účinného odsávání prodloužila na  $x/b = 25,5$  při použití trubiček,  $x/b = 25,8$  u přívodu dírkami a  $x/b = 26,6$  u přívodu vzduchu štěrbinou. Oblast účinného odsávání v ose odsávací štěrby je oproti tradičnímu odsávání ( $x/b = 22,1$ ) delší při použití trubiček ( $x/b = 27,5$ ), při využití dírek ( $x/b = 28,4$ ) i při použití štěrby ( $x/b = 30,1$ ) pro přívod vzduchu, ale v porovnání s nastavením pracovního parametru  $I = 0,3$  došlo ke zkrácení účinné oblasti u všech typů přívodu vzduchu.

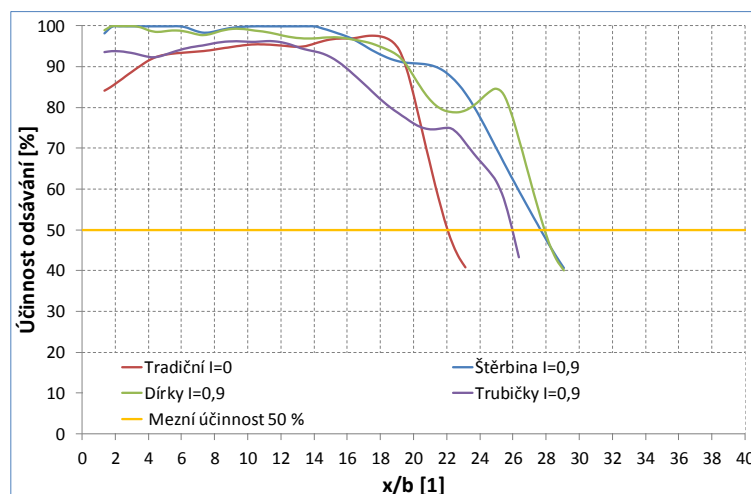


Obr. 5.29 – Porovnání účinnosti odsávání v ose odsávací štěrby s přepážkou v úrovni horní hrany příruby s pracovním parametrem  $I = 0$  a  $0,6$

Dalším zvýšením pracovního parametru na hodnotu  $I = 0,9$  došlo u všech variant zesíleného odsávání ke zhoršení účinnosti v oblasti vysoce účinného odsávání. Délka oblasti vysoce účinného odsávání se nejvíce zkrátila u přívodu vzduchu trubičkami na hodnotu  $x/b = 18,6$  což je méně než při tradičním odsávání ( $x/b = 20,2$ ). Při použití dírek pro přívod vzduchu je  $x/b = 21,5$  (resp.  $x/b = 25,8$ ) a při použití štěrby  $x/b = 23,7$ .

Oblast účinného odsávání v ose odsávací štěrby je u všech typů přívodu delší, než při tradičním odsávání ( $x/b = 22,1$ ) avšak u všech typů přívodu došlo k poklesu délky oblasti

účinného odsávání v ose odsávací štěrby na  $x/b = 25,9$  při použití trubiček,  $x/b = 27,7$  při využití štěrby a  $x/b = 27,9$  při použití dírek pro přívod vzduchu.



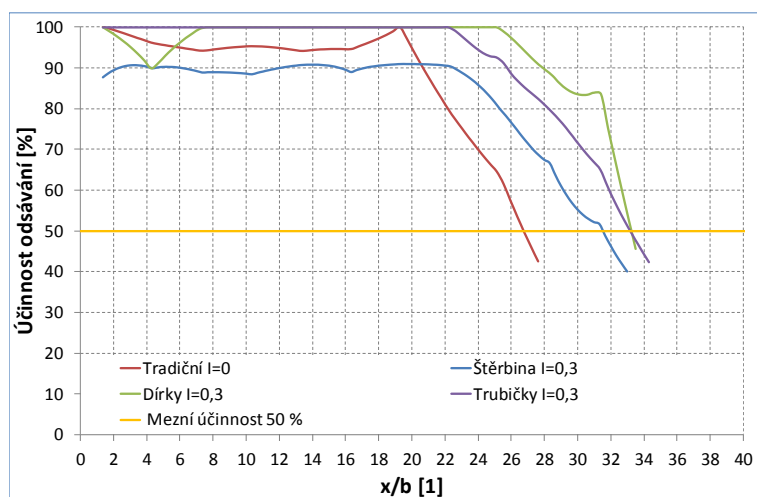
Obr. 5.30 – Porovnání účinnosti odsávání v ose odsávací štěrby s přepážkou v úrovni horní hrany příruby s pracovním parametrem  $I = 0$  a  $0,9$

Celkově bylo dosahováno nejlepších výsledků účinnosti odsávání v ose odsávací štěrby s přepážkou v úrovni horní hrany příruby, pokud bylo využito pro přívod vzduchu štěrby a dírek. Nejdelší oblasti vysoce účinného odsávání s 80% a vyšší účinností bylo dosahováno při pracovním parametru  $I = 0,6$ . A nejdelší oblasti účinného odsávání bylo dosaženo při pracovním parametru  $I = 0,3$ .

## 5.11 Porovnání účinnosti odsávání v ose odsávací štěrbině s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbině

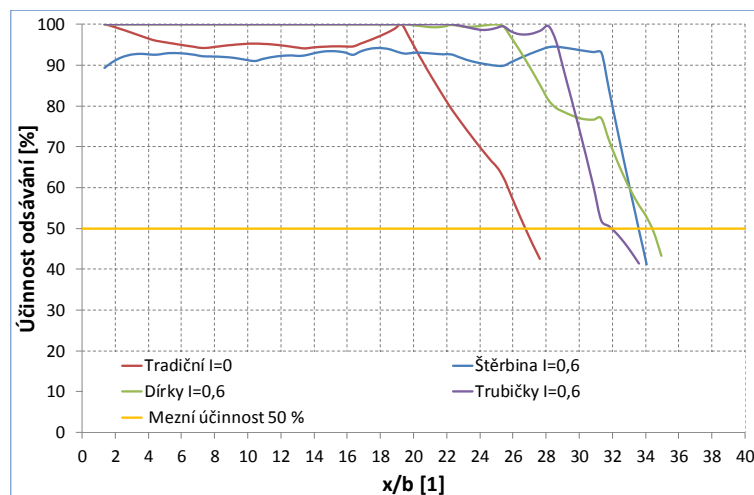
Výsledky porovnání účinnosti odsávání v ose odsávací štěrbině tradičního a zesíleného štěrbinového sacího nástavce v konfiguraci s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbině, při použití jednotlivých typů přívodu vzduchu (štěrbinou, dírkami, trubičkami) a pro pracovní parametry  $I = 0,3$ ;  $0,6$  a  $0,9$  jsou uvedeny v obr. 5.31, obr. 5.32 a obr. 5.33.

Při nastavení pracovního parametru na hodnotu  $I = 0,3$  lze pozorovat větší účinnosti odsávání oproti tradičnímu sacímu nástavci u zesíleného odsávání s přívodem vzduchu dírkami a trubičkami. U všech variant zesíleného odsávání došlo také k prodloužení oblasti vysoce účinného odsávání s 80% a vyšší účinností z  $x/b = 22,2$  u tradičního odsávání na  $x/b = 25,3$  u přívodu štěrbinou, u přívodu trubičkami  $x/b = 28,3$  a při použití dírek pro přívod vzduchu na  $x/b = 31,6$ . Oblast účinného odsávání v ose odsávací štěrbině se prodloužila z  $x/b = 26,7$  u tradičního odsávání na  $x/b = 31,6$  při použití štěrbinou,  $x/b = 33,1$  při využití trubiček a  $x/b = 33,2$  při použití dírek pro přívod vzduchu.



Obr. 5.31 – Porovnání účinnosti odsávání v ose odsávací štěrbině s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbině s pracovním parametrem  $I = 0$  a  $0,3$

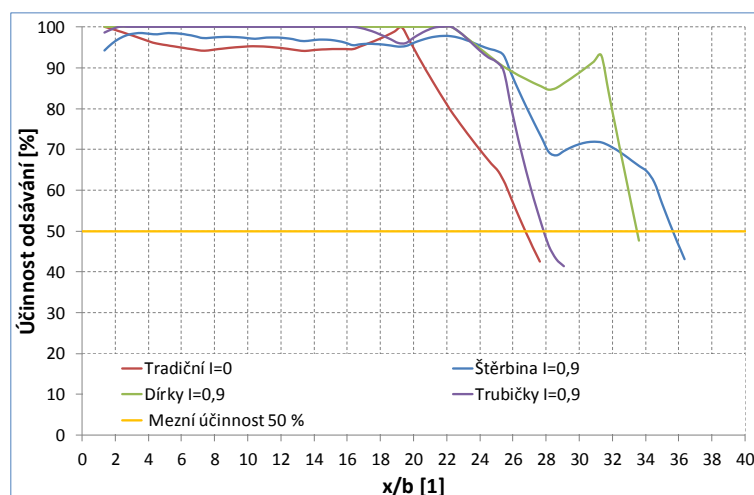
Při nastaveném pracovním parametru na hodnotu  $I = 0,6$  je nejvyšších účinností odsávání na největší vzdálenosti dosahováno s přívodem vzduchu trubičkami a dírkami. Oproti tradičnímu odsávání ( $x/b = 22,2$ ) se oblast vysoce účinného odsávání prodloužila na  $x/b = 28,5$  při použití dírek,  $x/b = 29,6$  u přívodu trubičkami a  $x/b = 32,0$  u přívodu vzduchu štěrbinou. Oblast účinného odsávání v ose odsávací štěrbině je oproti tradičnímu odsávání ( $x/b = 26,7$ ) vždy delší, a to při použití trubiček ( $x/b = 32,0$ ), při využití štěrbinou ( $x/b = 33,6$ ) a při použití dírek ( $x/b = 34,4$ ) pro přívod vzduchu. V porovnání s nastavením pracovního parametru na  $I = 0,3$  došlo ke zkrácení účinné oblasti u přívodu vzduchu trubičkami a k prodloužení při přívodu vzduchu štěrbinou a dírkami.



Obr. 5.32 – Porovnání účinnosti odsávání v ose odsávací štěrby s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby s pracovním parametrem  $I = 0$  a  $0,6$

Zvýšením pracovního parametru na hodnotu  $I = 0,9$  došlo ke zvýšení účinnosti odsávání u varianty s přívodem vzduchu štěrbinou. Délka oblasti vysoce účinného odsávání oproti tradičnímu odsávání ( $x/b = 22,2$ ) se nejvíce zkrátila u přívodu vzduchu trubičkami na hodnotu  $x/b = 25,9$ . Při použití štěrby pro přívod vzduchu je  $x/b = 26,8$  a při použití dírek  $x/b = 32,0$ .

Oblast účinného odsávání v ose odsávací štěrby je u všech typů přívodu větší než při tradičním odsávání ( $x/b = 26,7$ ) avšak při přívodu vzduchu trubičkami ( $x/b = 27,8$ ) a dírkami ( $x/b = 33,5$ ) došlo k poklesu délky oblasti účinného odsávání v ose odsávací štěrby oproti nastavení pracovního parametru na  $I = 0,6$ . U přívodu vzduchu štěrbinou došlo k nárůstu dosahu odsávání na hodnotu  $x/b = 35,6$ .



Obr. 5.33 – Porovnání účinnosti odsávání v ose odsávací štěrby s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby s pracovním parametrem  $I = 0$  a  $0,9$

Celkově bylo dosahováno vyšší účinnosti odsávání v ose odsávací štěrby s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby, pokud bylo využito pro přívod vzduchu dírek a trubiček. Nejdelší oblasti vysoce účinného odsávání s 80% a vyšší účinností bylo dosahováno při použití dírek pro přívod vzduchu a to ve dvou ze tří nastavení pracovního parametru. A nejdelší oblasti účinného odsávání bylo dosaženo při pracovním parametru  $I = 0,9$  a použití štěrby pro přívod vzduchu.

## 6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ RYCHLOSTNÍCH POLÍ ŠTĚRBINOVÉHO SACÍHO NÁSTAVCE

Výsledky měření rychlostních polí jsou při různých módech sacího nástavce ( $I = 0$ ;  $I = 0,3$ ;  $I = 0,6$  a  $I = 0,9$ ) zobrazeny v diagramech, ve kterých jsou vykresleny izočáry konstantních absolutních rychlostí. Diagramy jsou vytvořeny v bezrozměrných souřadnicích poměrné vzdálenosti od odsávací štěrby vztažené k šířce odsávací štěrby  $b = 15$  mm. Následně jsou uvedeny také grafy rychlostí v ose odsávací štěrby, ve kterých je zakresleno pospojování bodů (z důvodu přehlednosti bez jednotlivých bodů).

Vzhledem k povaze škodlivin a pohybu vzduchu v místnosti, rychlost proudu směřujícího do sacího otvoru musí být vyšší než minimální rychlost, která je známá jako záchytná rychlost (capture velocity). Dle tab. 1.1 budou používány dvě záchytné rychlosti a to  $w_x = 0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a  $w_x = 0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Autoři Høgsted (Høgsted 1987), Hunt a Ingram (Hunt a Ingham 1992), Saunders a Fletcher (Saunders a Fletcher 1993), postupně definovali tzv. účinnou oblast odsávání, ze které je vzduch se škodlivinami odsán z pracovního prostoru do sacího otvoru, okraje této oblasti jsou definovány izotachou záchytné rychlosti. Směr záchytné rychlosti je také důležitý, ale použitou metodou měření jej není možné určit. V okolí proudu přiváděného vzduchu (s pracovním parametrem  $I > 0$ ) tedy izotacha rychlosti  $0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  resp.  $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  nedefinuje hranici účinné oblasti odsávání, proto je potřeba brát také v úvahu polohu vyhodnocovaného bodu vůči odsávací štěrbině resp. přívodnímu proudu.

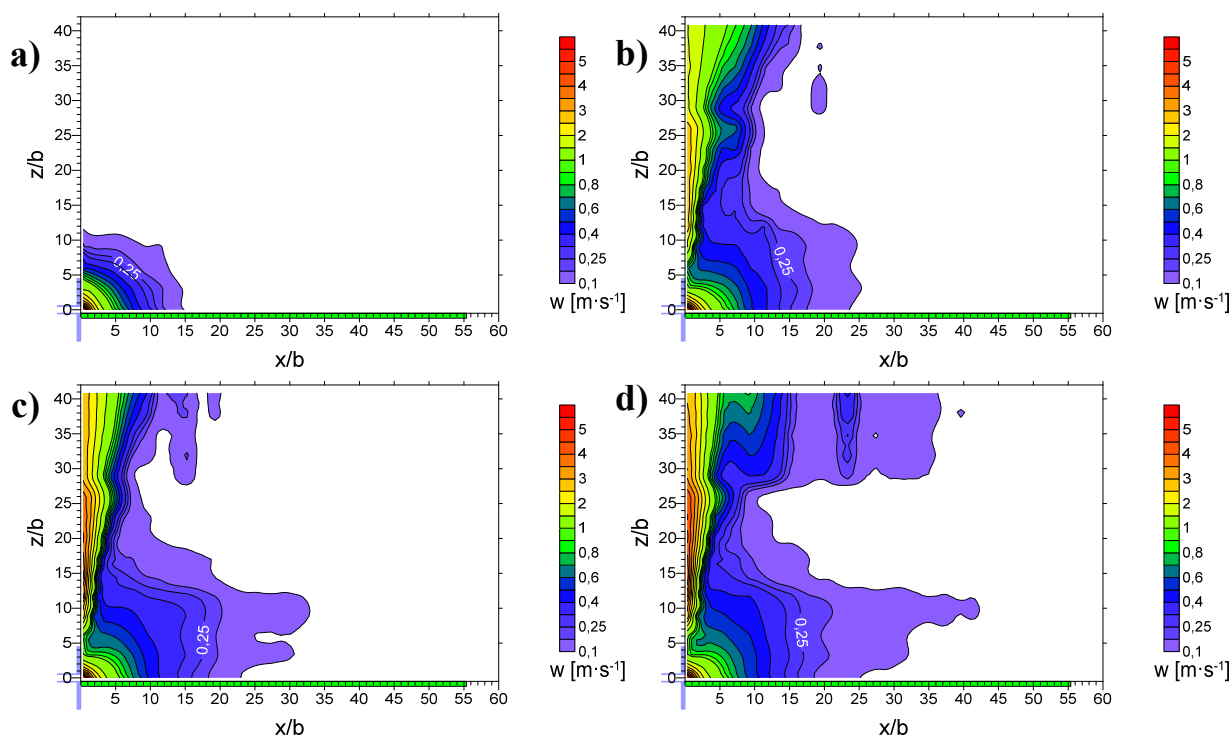
Jelikož jsou důležité záchytné rychlosti směřující do odsávací štěrby, větší zájem je věnován porovnání zejména rychlostí v ose štěrby, které tomuto požadavku vyhovují.

Z prvních výsledků měření účinnosti odsávání s pracovním stolem (přepážkou) v úrovni spodní hrany příruby a v úrovni spodní hrany odsávací štěrby zpracovaných v pojednání ke státní doktorské zkoušce byla vybrána konfigurace s lepšími výsledky, tj. se stolem v úrovni spodní hrany odsávací štěrby a na této konfiguraci bylo v rámci pojednání ke státní doktorské zkoušce změřeno proudové pole. Následně po úpravě polohy přepážky a návrhu nových typů přívodů vzduchu bylo změřeno proudové pole na těchto nových konfiguracích.

### 6.1 Výsledky měření rychlostního pole s pracovním stolem v úrovni spodní hrany odsávací štěrby – přívod štěrbinou

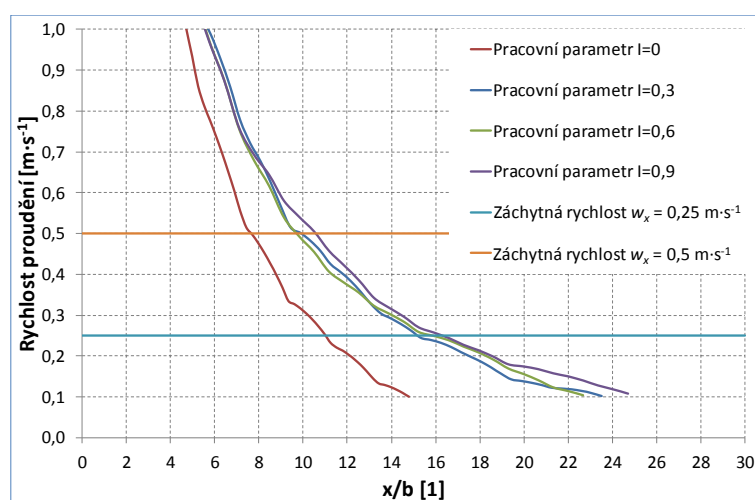
Rozložení absolutních rychlostí před sacím nástavcem (přívod vzduchu štěrbinou) s pracovním stolem – přepážkou v úrovni spodní hrany odsávací štěrby je uvedeno na obr. 6.1, kde jsou vykresleny izotachy v různých pracovních módech ( $I = 0$ ;  $I = 0,3$ ;  $I = 0,6$  a  $I = 0,9$ ). Z rychlostního pole vyplývá, že účinný dosah proudu směřujícího do sacího otvoru (rychlost  $0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  resp.  $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) se nachází pro poměr hybnostních toků  $I = 0$  (bez přívodu radiálního proudu) ve vzdálenosti  $x/b = 11,0$  resp.  $7,7$  před sacím nástavcem. Pro  $I = 0,3$  je účinný dosah proudu ve vzdálenosti  $x/b = 16,1$  resp.  $9,6$ ; pro  $I = 0,6$  se nachází ve vzdálenosti  $x/b = 17,9$  resp.  $9,8$  a pro  $I = 0,9$  je ve vzdálenosti  $x/b = 17,0$  resp.  $10,6$ .

V případě odsávání s pracovním parametrem  $I = 0$  je plocha účinného odsávání kratší v porovnání s ostatními případy nastavení pracovního parametru  $I$ . Při zvětšování pracovního parametru  $I$ , se plocha účinného odsávání prodlužuje. Pouze při pracovním parametru  $I = 0,9$  došlo ke zkrácení dosahu pro záchytnou rychlost  $0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  oproti dalším nastavením pracovního parametru. Při provozu sacího nástavce v zesíleném módu je také možné pozorovat relativně úzký přívodní proud vzduchu.



Obr. 6.1 – Rychlostní pole ve vertikální rovině jdoucí osou sacího nástavce s pracovním stolem – přepážkou v úrovni spodní hrany odsávací štěrbinou – přívod štěrbinou s pracovním parametrem: a)  $I = 0$ ; b)  $I = 0,3$ ; c)  $I = 0,6$ ; d)  $I = 0,9$

Na obr. 6.2 jsou vykresleny rychlosti proudění v ose odsávací štěrbinou odsávacího nástavce při čtyřech různých nastaveních pracovního parametru  $I$ . V tomto obrázku je také vykreslena záchytná rychlost  $w_x = 0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a  $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Při zvyšování pracovního parametru  $I$  došlo k prodloužení záchytné vzdálenosti v ose odsávací štěrbinou z hodnoty  $x/b = 11,0$  (pro  $w_x = 0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) resp.  $x/b = 7,7$  (pro  $w_x = 0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) při tradičním odsávání ( $I = 0$ ), na  $x/b = 15,2$  resp.  $9,9$  pro odsávání s pracovním parametrem  $I = 0,3$ ; na  $x/b = 15,9$  resp.  $9,6$  pro odsávání s pracovním parametrem  $I = 0,6$  a na  $x/b = 16,3$  resp.  $10,6$  v případě s pracovním parametrem  $I = 0,9$ .



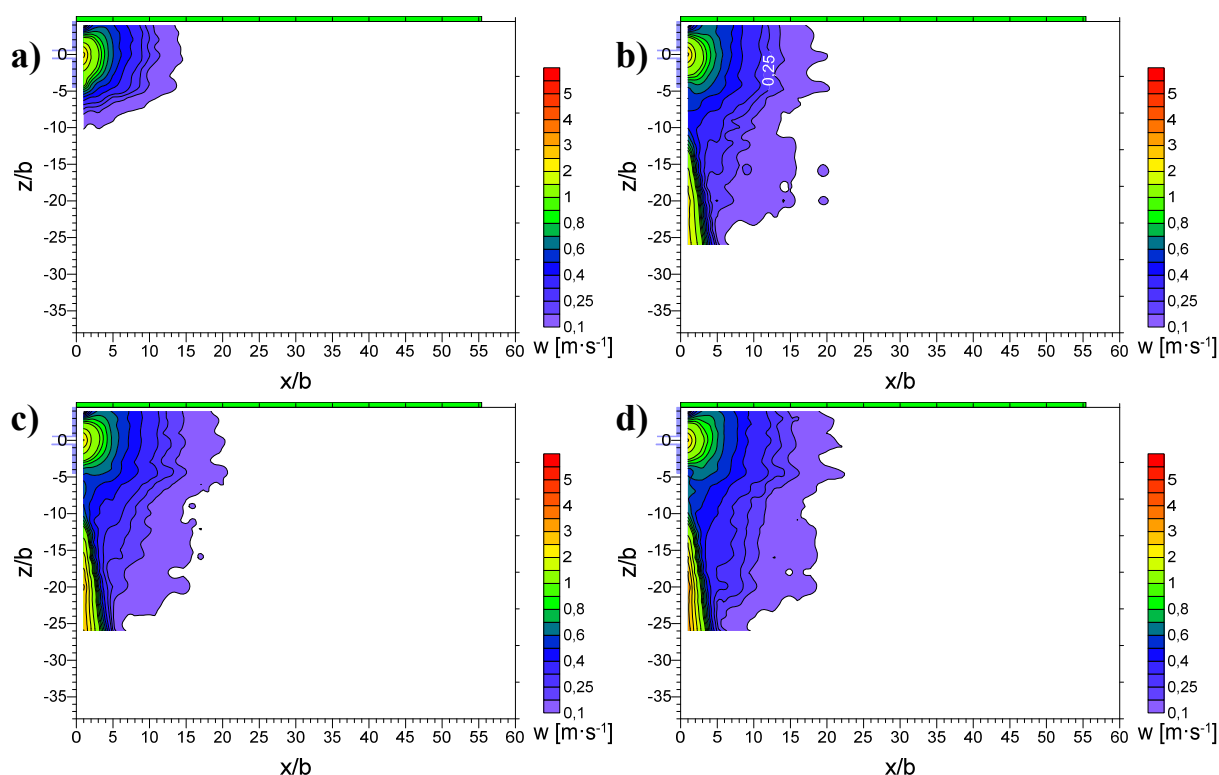
Obr. 6.2 – Porovnání rychlostí proudění v ose odsávací štěrbinou s pracovním stolem – přepážkou v úrovni spodní hrany odsávací štěrbinou – přívod štěrbinou



## 6.2 Výsledky měření rychlostního pole s přepážkou v úrovni horní hrany příruby – přívod štěrbinou

V případě umístění přepážky v úrovni horní hrany příruby jsou výsledky rychlostních polí zobrazeny na obr. 6.3. Z rychlostního pole vyplývá, že účinný dosah proudu směřujícího do sacího otvoru (rychlost  $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  resp.  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) se nachází pro poměr hybnostních toků  $I = 0$  (bez přívodu radiálního proudu) ve vzdálenosti  $x/b = 10,0$  resp.  $6,1$  před sacím nástavcem. Pro  $I = 0,3$  je účinný dosah proudu ve vzdálenosti  $x/b = 12,3$  resp.  $7,2$ ; pro  $I = 0,6$  se nachází ve vzdálenosti  $x/b = 13,3$  resp.  $7,4$  a pro  $I = 0,9$  je ve vzdálenosti  $x/b = 14,2$  resp.  $7,8$ .

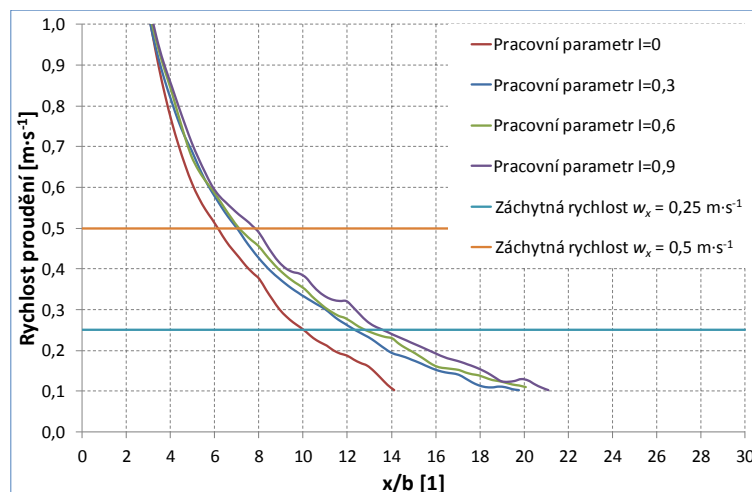
V případě tradičního odsávání ( $I = 0$ ) je plocha účinného odsávání kratší v porovnání s ostatními případy zesíleného odsávání. Při zvětšování pracovního parametru  $I$  došlo k prodlužování zachytne vzdálenosti při všech nastaveních zesíleného odsávání. Opět je možné pozorovat úzký přívodní proud vzduchu.



Obr. 6.3 – Rychlostní pole ve vertikální rovině jdoucí osou sacího nástavce s přepážkou v úrovni horní hrany příruby – přívod štěrbinou s pracovním parametrem: a)  $I = 0$ ; b)  $I = 0,3$ ; c)  $I = 0,6$ ; d)  $I = 0,9$

Rychlosti proudění v ose odsávací štěrbině při čtyřech různých nastaveních pracovního parametru  $I$  jsou vykresleny na obr. 6.4. Při zvyšování pracovního parametru  $I$  došlo k prodloužení zachytne vzdálenosti v ose odsávací štěrbině z hodnoty  $x/b = 10,0$  (pro  $w_x = 0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) resp.  $x/b = 6,1$  (pro  $w_x = 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) při tradičním odsávání ( $I = 0$ ), na  $x/b = 12,3$  resp.  $7,0$  pro odsávání s pracovním parametrem  $I = 0,3$ ; na  $x/b = 12,8$  resp.  $7,1$  pro odsávání s pracovním parametrem  $I = 0,6$  a na  $x/b = 13,6$  resp.  $7,8$  v případě s pracovním parametrem  $I = 0,9$ .





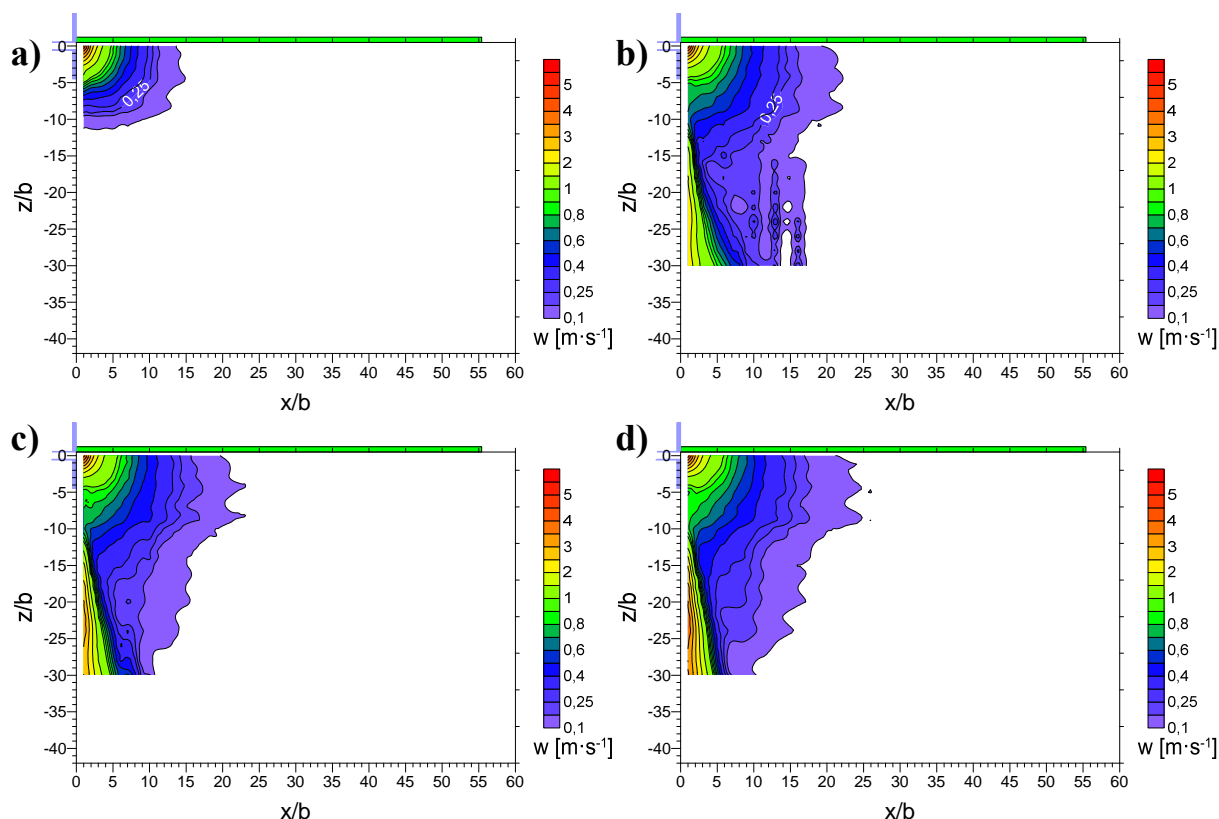
Obr. 6.4 – Porovnání rychlostí proudění v ose odsávací štěrbiny s přepážkou v úrovni horní hrany příruby – přívod štěrbinou

### 6.3 Výsledky měření rychlostního pole s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbiny – přívod štěrbinou

Výsledky rychlostních polí před zesíleným štěrbinovým sacím nástavcem s přívodem vzduchu štěrbinou a přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbiny lze vidět na obr. 6.5. Z rychlostního pole vyplývá, že účinný dosah proudu směřujícího do sacího otvoru (rychlost  $0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  resp.  $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) se nachází pro poměr hybnostních toků  $I = 0$  (bez přívodu radiálního proudu) ve vzdálenosti  $x/b = 10,5$  resp.  $7,5$  před sacím nástavcem. Pro  $I = 0,3$  je účinný dosah proudu ve vzdálenosti  $x/b = 15,0$  resp.  $9,8$ ; pro  $I = 0,6$  se nachází ve vzdálenosti  $x/b = 14,7$  resp.  $9,7$  a pro  $I = 0,9$  je ve vzdálenosti  $x/b = 15,8$  resp.  $10,1$ .

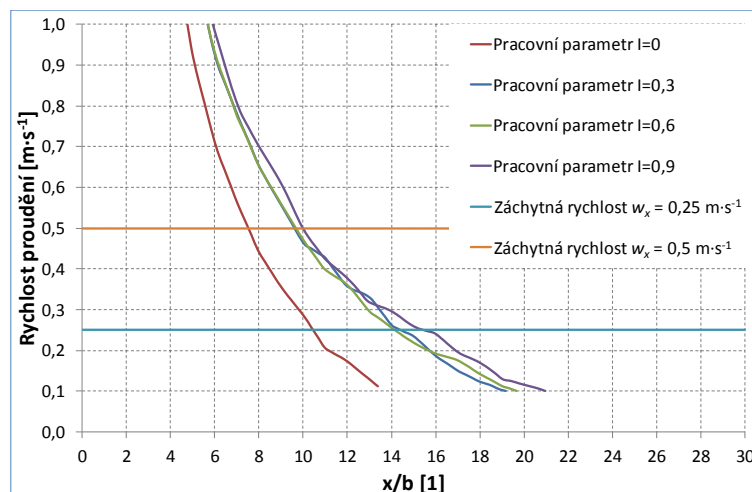
Při zesíleném odsávání došlo k prodloužení plochy účinného odsávání. Při zvětšování pracovního parametru  $I$ , se oblast účinného odsávání dále prodlužovala. Opět je možné pozorovat úzký přívodní proud vzduchu, který se dále rozšiřuje se zvětšující se vzdáleností (nyní je možné vidět větší úsek přívodního proudu oproti předchozí konfiguraci).

Tato konfigurace 5. (z tab. 3.1 na str. 41) by měla mít shodné výsledky s měřením uvedeným v kap. 6.1 (pro konfiguraci 3. z tab. 3.1 na str. 41), pouze zrcadlově převrácené podle roviny  $x$ - $y$ . Dosahy oblastí účinného odsávání jsou ale u konfigurace 5. tj. s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbiny kratší. Největší rozdíly lze pozorovat při zachytné rychlosti  $0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Rozdíly mohou být způsobeny jiným uchycením termo-anemometrických senzorů při měření konfigurace 3., kdy byly senzory pootočený v úhlu  $30^\circ$  vůči rovině příruby, což mohlo způsobit nárůst naměřené rychlosti dle obr. 3.29 o 13 – 16 %.



*Obr. 6.5 – Rychlostní pole ve vertikální rovině jdoucí osou sacího nástavce s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbinou – přívod štěrbinou s pracovním parametrem: a)  $I = 0$ ; b)  $I = 0,3$ ; c)  $I = 0,6$ ; d)  $I = 0,9$*

Porovnání rychlostí proudění v ose odsávací štěrbinou při čtyřech různých nastaveních pracovního parametru  $I$  jsou vykresleny na obr. 6.6. Při zvyšování pracovního parametru  $I$  došlo k prodloužení zachytivé vzdálenosti v ose odsávací štěrbinou z hodnoty  $x/b = 10,5$  (pro  $w_x = 0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) resp.  $x/b = 7,5$  (pro  $w_x = 0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) při tradičním odsávání ( $I = 0$ ), na  $x/b = 14,4$  resp.  $9,6$  pro odsávání s pracovním parametrem  $I = 0,3$ ; na  $x/b = 14,2$  resp.  $9,7$  pro odsávání s pracovním parametrem  $I = 0,6$  a na  $x/b = 15,5$  resp.  $10,0$  v případě s pracovním parametrem  $I = 0,9$ . Při nastavení pracovního parametru na hodnotu  $I = 0,3$  a  $0,6$  jsou výsledky rychlostí v ose odsávací štěrbinou téměř identické. Při zvýšení pracovního parametru na hodnotu  $I = 0,9$  ještě došlo k mírnému zlepšení.

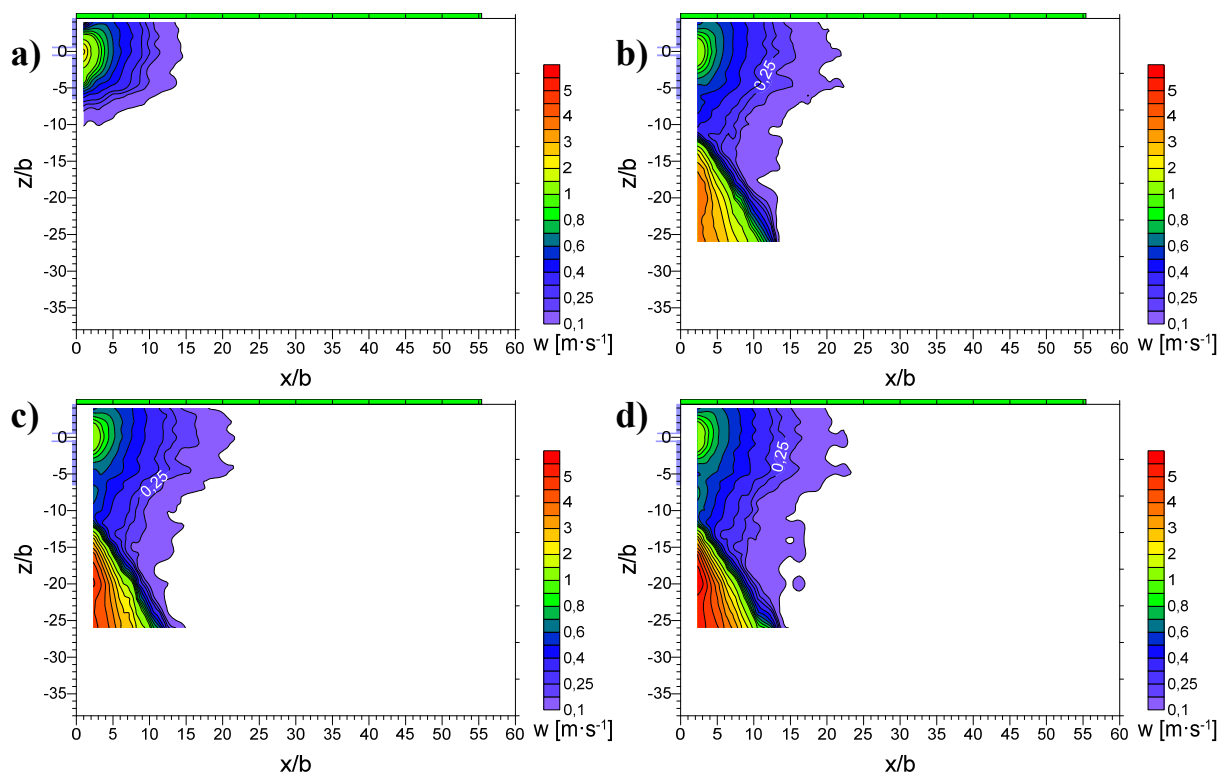


Obr. 6.6 – Porovnání rychlostí proudění v ose odsávací štěrbině s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbině – přívod štěrbinou

## 6.4 Výsledky měření rychlostního pole s přepážkou v úrovni horní hrany příruby – přívod dírkami

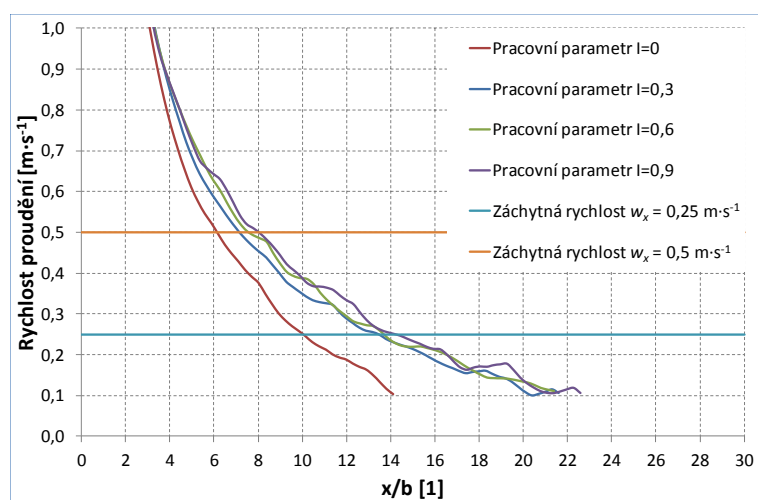
Výsledná rychlostní pole po změně typu přívodu vzduchu na dírky a s přepážkou v úrovni horní hrany příruby jsou zobrazena na obr. 6.7. Účinný dosah proudu směřujícího do sacího otvoru (rychlost  $0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  resp.  $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) se nachází pro poměr hybnostních toků  $I = 0$  (bez přívodu radiálního proudu) ve vzdálenosti  $x/b = 10,0$  resp.  $6,1$  před sacím nástavcem. Pro  $I = 0,3$  je účinný dosah proudu ve vzdálenosti  $x/b = 13,5$  resp.  $7,2$ , pro  $I = 0,6$  se nachází ve vzdálenosti  $x/b = 13,6$  resp.  $7,9$  a pro  $I = 0,9$  je ve vzdálenosti  $x/b = 14,4$  resp.  $8,3$ .

Při zvětšování pracovního parametru  $I$ , došlo k prodlužování oblasti účinného odsávání. Ve výsledcích je také možné pozorovat značně se rozšiřující přívodní proud vzduchu.



Obr. 6.7 – Rychlostní pole ve vertikální rovině jdoucí osou sacího nástavce s přepážkou v úrovni horní hrany příruby – přívod dírkami, s pracovním parametrem: a)  $I = 0$ ; b)  $I = 0,3$ ; c)  $I = 0,6$ ; d)  $I = 0,9$

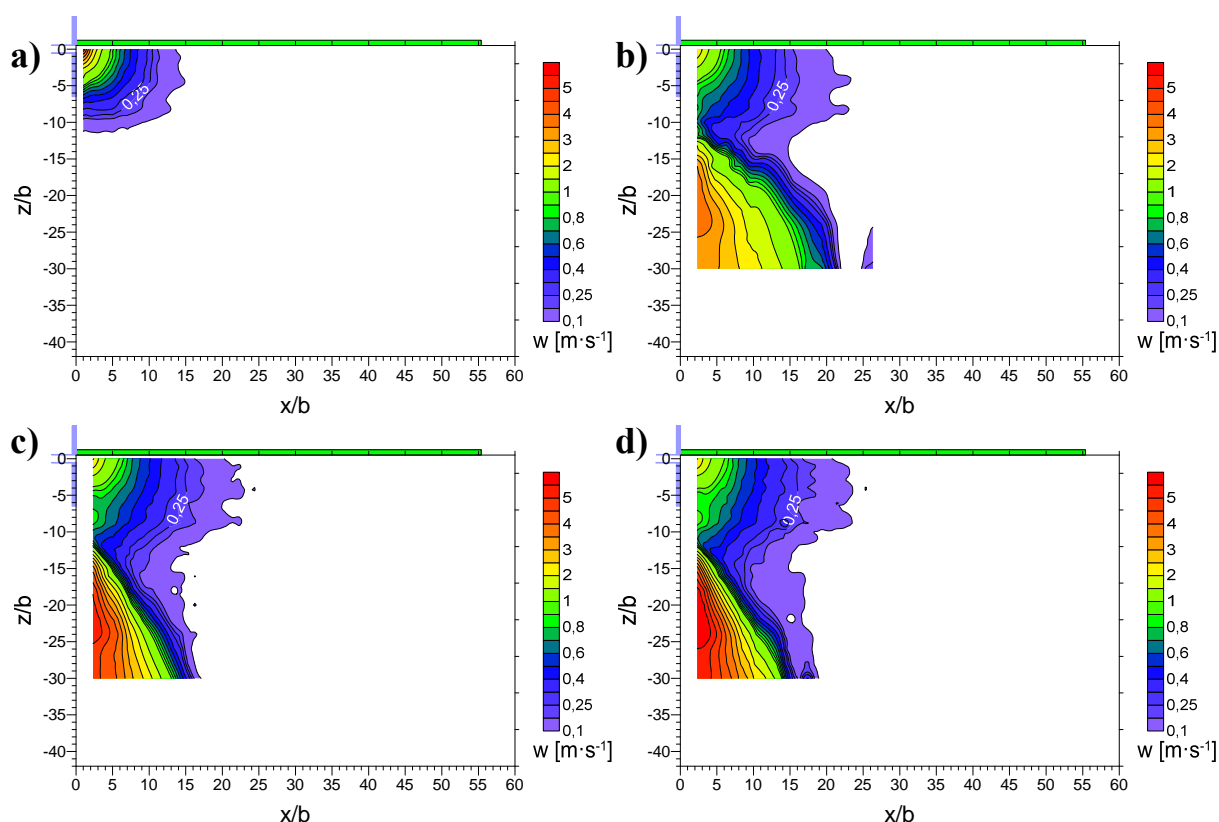
Na obr. 6.8 lze vidět porovnání rychlostí proudění v ose odsávací štěrby pro čtyři nastavení pracovního parametru  $I$ . Při zvyšování pracovního parametru  $I$  došlo k prodloužení zachytné vzdálenosti v ose odsávací štěrby z hodnoty  $x/b = 10,0$  (pro  $w_x = 0,25 \text{ m·s}^{-1}$ ) resp.  $x/b = 6,1$  (pro  $w_x = 0,5 \text{ m·s}^{-1}$ ) při tradičním odsávání ( $I = 0$ ), na  $x/b = 13,5$  resp.  $7,2$  pro odsávání s pracovním parametrem  $I = 0,3$ ; na  $x/b = 13,6$  resp.  $7,6$  pro odsávání s pracovním parametrem  $I = 0,6$  a na  $x/b = 14,3$  resp.  $8,0$  v případě s pracovním parametrem  $I = 0,9$ .



Obr. 6.8 – Porovnání rychlostí proudění v ose odsávací štěrby s přepážkou v úrovni horní hrany příruby – přívod dírkami

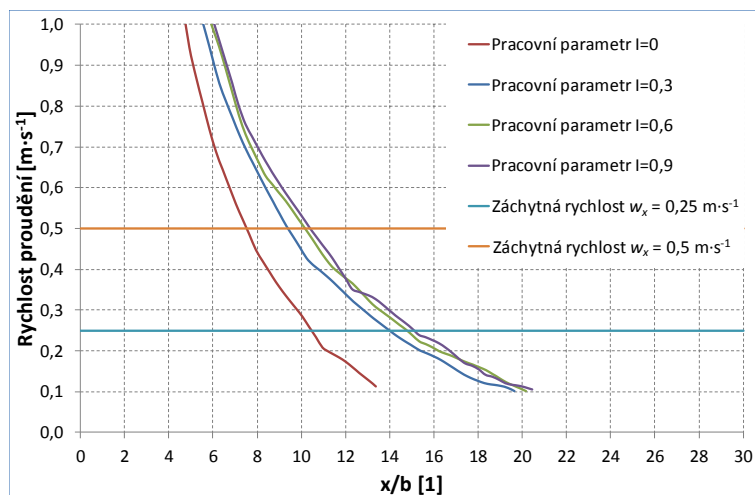
## 6.5 Výsledky měření rychlostního pole s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby – přívod dírkami

V případě umístění přepážky v úrovni horní hrany odsávací štěrby a přívodem vzduchu dírkami, jsou výsledky rychlostních polí zobrazeny na obr. 6.9. Z rychlostního pole vyplývá, že účinný dosah proudu směřujícího do sacího otvoru (rychlost  $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  resp.  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) se nachází pro poměr hybnostních toků  $I = 0$  (bez přívodu radiálního proudu) ve vzdálenosti  $x/b = 10,5$  resp.  $7,5$  před sacím nástavcem. Pro  $I = 0,3$  je účinný dosah proudu ve vzdálenosti  $x/b = 14,5$  resp.  $9,5$ ; pro  $I = 0,6$  se nachází ve vzdálenosti  $x/b = 15,3$  resp.  $10,2$  a pro  $I = 0,9$  je ve vzdálenosti  $x/b = 16,1$  resp.  $10,5$ . Při zvětšování pracovního parametru  $I$ , došlo k prodlužování oblasti účinného odsávání. Ve výsledcích je také možné pozorovat značně se rozšiřující přívodní proud vzduchu (nyní je možné pozorovat větší úsek přívodního proudu oproti předchozí konfiguraci).



Obr. 6.9 – Rychlostní pole ve vertikální rovině jdoucí osou sacího nástavce s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby – přívod dírkami, s pracovním parametrem:  
 a)  $I = 0$ ; b)  $I = 0,3$ ; c)  $I = 0,6$ ; d)  $I = 0,9$

Rychlosti proudění v ose odsávací štěrby při čtyřech různých nastaveních pracovního parametru  $I$  jsou vykresleny v obr. 6.10. Při zvyšování pracovního parametru  $I$  došlo k prodloužení zachytané vzdálenosti v ose odsávací štěrby z hodnoty  $x/b = 10,5$  (pro  $w_x = 0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) resp.  $x/b = 7,5$  (pro  $w_x = 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) při tradičním odsávání ( $I = 0$ ), na  $x/b = 14,0$  resp.  $9,4$  pro odsávání s pracovním parametrem  $I = 0,3$ ; na  $x/b = 14,8$  resp.  $10,2$  pro odsávání s pracovním parametrem  $I = 0,6$  a na  $x/b = 15,1$  resp.  $10,4$  v případě s pracovním parametrem  $I = 0,9$ .

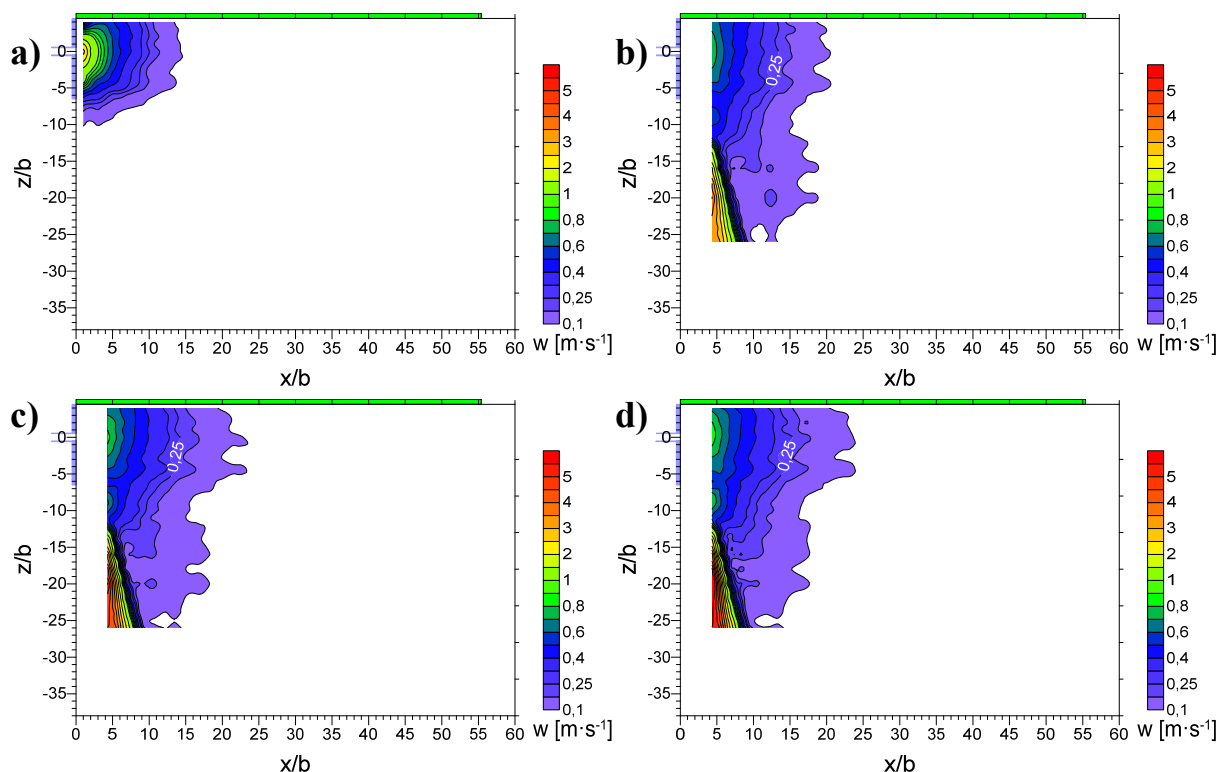


Obr. 6.10 – Porovnání rychlostí proudění v ose odsávací štěrby s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby – přívod dírkami

## 6.6 Výsledky měření rychlostního pole s přepážkou v úrovni horní hrany příruby – přívod trubičkami

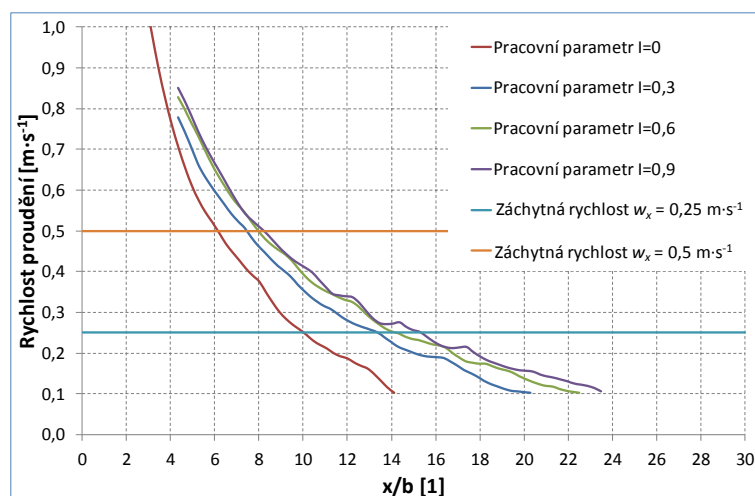
Výsledky měření rychlostních polí po změně typu přívodu vzduchu na trubičky a s přepážkou v úrovni horní hrany příruby jsou zobrazeny na obr. 6.11. Účinný dosah proudu směřujícího do sacího otvoru (rychlost  $0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  resp.  $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) se nachází pro poměr hybnostních toků  $I = 0$  (bez přívodu radiálního proudu) ve vzdálenosti  $x/b = 10,0$  resp.  $6,1$  před sacím nástavcem. Pro  $I = 0,3$  je účinný dosah proudu ve vzdálenosti  $x/b = 13,5$  resp.  $7,5$ ; pro  $I = 0,6$  se nachází ve vzdálenosti  $x/b = 14,2$  resp.  $8,2$  a pro  $I = 0,9$  je ve vzdálenosti  $x/b = 15,3$  resp.  $8,4$ .

Při zvětšování pracovního parametru  $I$ , došlo k prodloužení oblasti účinného odsávání. Ve výsledcích je také možné pozorovat relativně úzký přívodní proud vzduchu, který je díky přívodu trubičkami posunut více ve směru osy  $x$ .



Obr. 6.11 – Rychlostní pole ve vertikální rovině jdoucí osou sacího nástavce s přepážkou v úrovni horní hrany příruby – přívod trubičkami, s pracovním parametrem:  
a)  $I = 0$ ; b)  $I = 0,3$ ; c)  $I = 0,6$ ; d)  $I = 0,9$

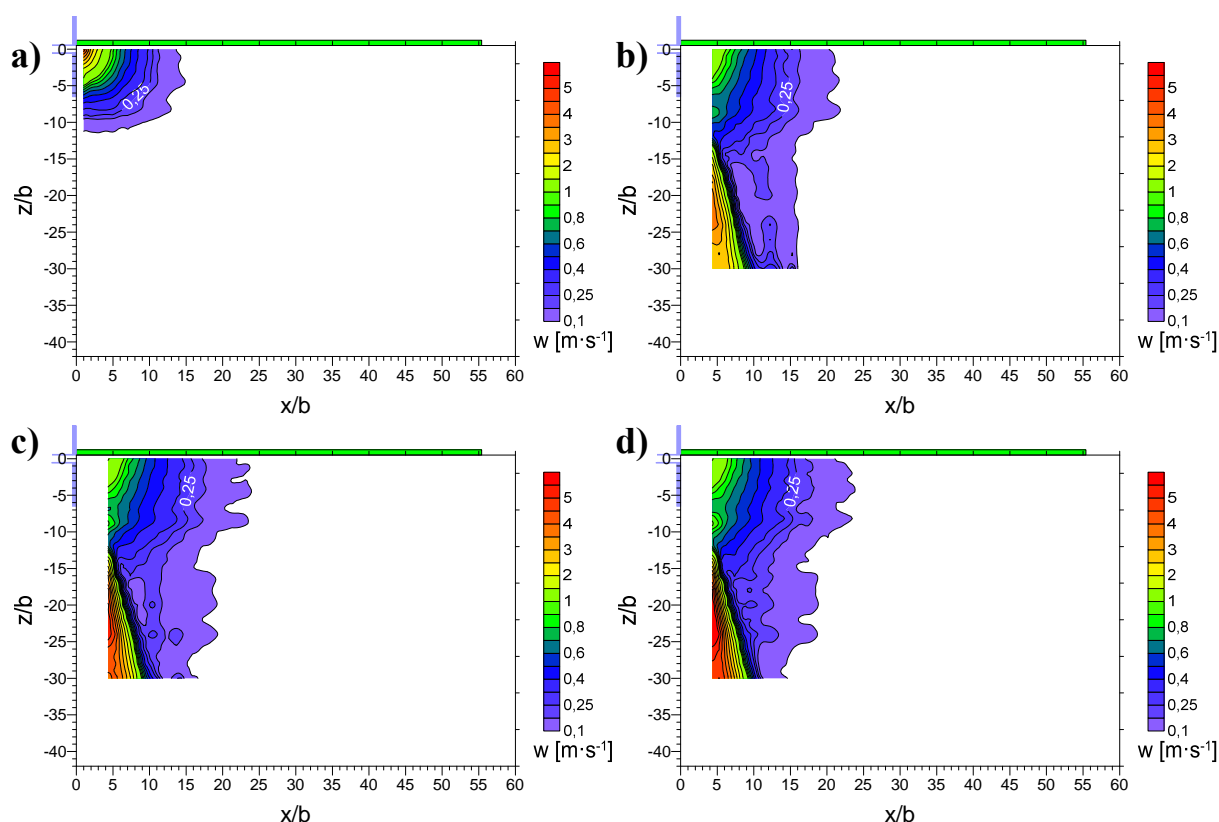
Rychlosti proudění v ose odsávací štěrby při čtyřech různých nastaveních pracovního parametru  $I$  jsou vykresleny na obr. 6.12. Při zvyšování pracovního parametru  $I$  došlo k prodloužení zachytné vzdálenosti v ose odsávací štěrby z hodnoty  $x/b = 10,0$  (pro  $w_x = 0,25 \text{ m·s}^{-1}$ ) resp.  $x/b = 6,1$  (pro  $w_x = 0,5 \text{ m·s}^{-1}$ ) při tradičním odsávání ( $I = 0$ ), na  $x/b = 13,4$  resp.  $7,5$  pro odsávání s pracovním parametrem  $I = 0,3$ ; na  $x/b = 14,2$  resp.  $8,0$  pro odsávání s pracovním parametrem  $I = 0,6$  a na  $x/b = 15,3$  resp.  $8,2$  v případě s pracovním parametrem  $I = 0,9$ .



Obr. 6.12 – Porovnání rychlostí proudění v ose odsávací štěrby s přepážkou v úrovni horní hrany příruby – přívod trubičkami

## 6.7 Výsledky měření rychlostního pole s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby – přívod trubičkami

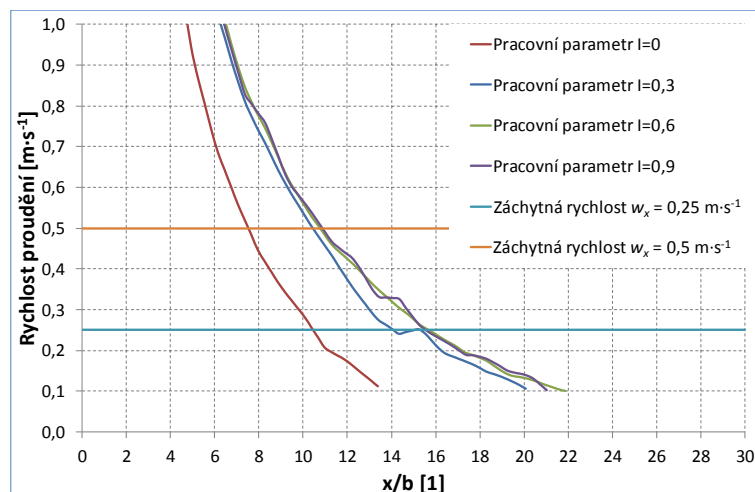
V případě umístění přepážky v úrovni horní hrany odsávací štěrby a přívodem vzduchu dírkami jsou výsledky rychlostních polí zobrazeny na obr. 6.13. Z rychlostního pole vyplývá, že účinný dosah proudu směřujícího do sacího otvoru (rychlost  $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  resp.  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) se nachází pro poměr hybnostních toků  $I = 0$  (bez přívodu radiálního proudu) ve vzdálenosti  $x/b = 10,5$  resp.  $7,5$  před sacím nástavcem. Pro  $I = 0,3$  je účinný dosah proudu ve vzdálenosti  $x/b = 14,8$  resp.  $10,4$ ; pro  $I = 0,6$  se nachází ve vzdálenosti  $x/b = 16,0$  resp.  $10,8$  a pro  $I = 0,9$  je ve vzdálenosti  $x/b = 16,0$  resp.  $10,9$ . Při zvětšování pracovního parametru  $I$ , došlo k prodlužování oblasti účinného odsávání až do hodnoty pracovního parametru  $I = 0,6$  při dalším zvyšování pracovního parametru již nedošlo k prodlužování účinných oblastí nebo jen nepatrně.



Obr. 6.13 – Rychlostní pole ve vertikální rovině jdoucí osou sacího nástavce s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby – přívod trubičkami, s pracovním parametrem:  
a)  $I = 0$ ; b)  $I = 0,3$ ; c)  $I = 0,6$ ; d)  $I = 0,9$

Rychlosti proudění v ose odsávací štěrby při čtyřech různých nastaveních pracovního parametru  $I$  jsou vykresleny v obr. 6.14. Při zvyšování pracovního parametru  $I$  došlo k prodloužení zachytne vzdálenosti v ose odsávací štěrby z hodnoty  $x/b = 10,5$  (pro  $w_x = 0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) resp.  $x/b = 7,5$  (pro  $w_x = 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) při tradičním odsávání ( $I = 0$ ), na  $x/b = 15,3$  resp.  $10,4$  pro odsávání s pracovním parametrem  $I = 0,3$ ; na  $x/b = 15,7$  resp.  $10,8$  pro odsávání s pracovním parametrem  $I = 0,6$  a na  $x/b = 15,7$  resp.  $10,9$  v případě s pracovním parametrem  $I = 0,9$ .



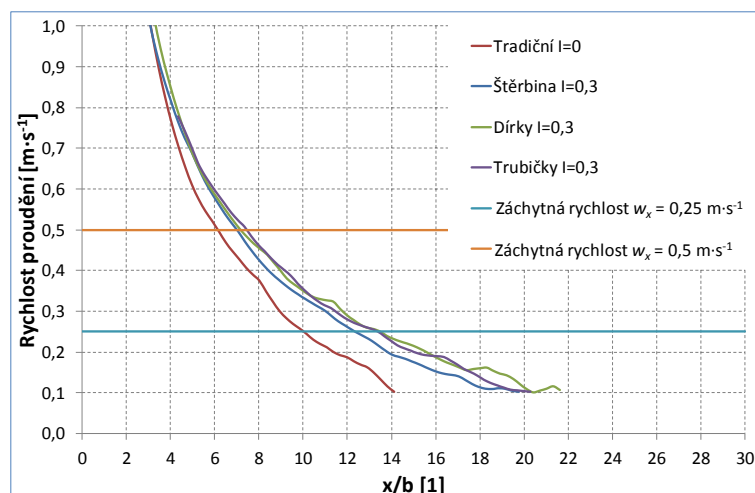


Obr. 6.14 – Porovnání rychlostí proudění v ose odsávací štěrbině s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbině – přívod trubičkami

## 6.8 Porovnání rychlostí v ose odsávací štěrbině s přepážkou v úrovni horní hrany příruby

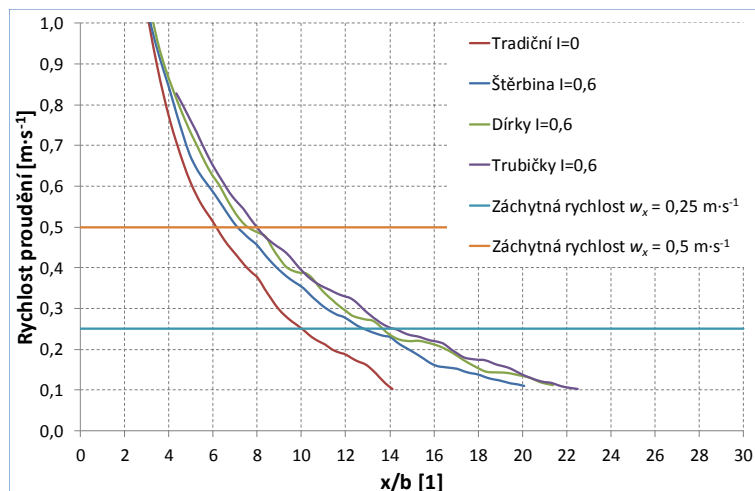
Výsledky porovnání rychlostí v ose odsávací štěrbině tradičního a zesíleného štěrbinového sacího nástavce v konfiguraci s přepážkou v úrovni horní hrany příruby, při použití jednotlivých typů přívodu vzduchu (štěrbinou, dírkami, trubičkami) a pro pracovní parametry  $I = 0,3; 0,6$  a  $0,9$  lze nalézt v obr. 6.15, obr. 6.16 a obr. 6.17.

Při nastavení pracovního parametru na hodnotu  $I = 0,3$  lze pozorovat větší dosah oblasti účinného odsávání oproti tradičnímu sacímu nástavci u všech použitých variant zesíleného odsávání pro obě zkoumané zachytné rychlosti ( $w_x = 0,25$  a  $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). U tradičního odsávání je dosah účinné oblasti  $x/b = 10,0$  resp.  $6,1$ ; při přívodu vzduchu štěrbinou se prodloužil na  $x/b = 12,3$  resp.  $7,0$ ; u přívodu dírkami došlo k prodloužení na  $x/b = 13,5$  resp.  $7,2$  a při použití trubiček pro přívod vzduchu na  $x/b = 13,4$  resp.  $7,5$ .



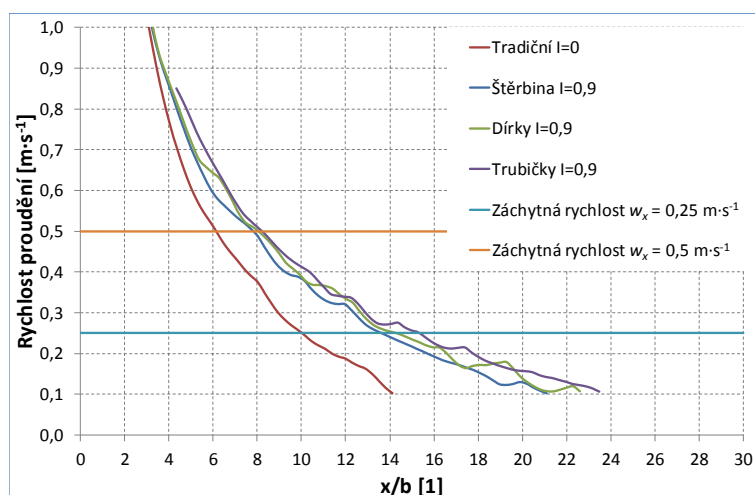
Obr. 6.15 – Porovnání rychlostí proudění v ose odsávací štěrbině s přepážkou v úrovni horní hrany příruby s pracovním parametrem  $I = 0$  a  $0,3$

Nastavením pracovního parametru na hodnotu  $I = 0,6$  se již více projeví rozdíly mezi jednotlivými typy přívodu vzduchu. U tradičního odsávání je dosah účinné oblasti  $x/b = 10,0$  resp. 6,1, při přívodu vzduchu štěrbinou se prodloužil na  $x/b = 12,8$  resp. 7,1; u přívodu dírkami došlo k prodloužení na  $x/b = 13,6$  resp. 7,6 a při použití trubiček pro přívod vzduchu na  $x/b = 14,22$  resp. 8,0.



Obr. 6.16 – Porovnání rychlostí proudění v ose odsávací štěrby s přepážkou v úrovni horní hrany příruby s pracovním parametrem  $I = 0$  a 0,6

Dalším zvýšením pracovního parametru na hodnotu  $I = 0,9$  došlo u všech variant zesíleného odsávání k dalšímu mírnému prodloužení účinné oblasti v ose odsávací štěrby pro obě zachytné rychlosti ( $w_x = 0,25$  a  $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). U tradičního odsávání je dosah účinné oblasti  $x/b = 10,0$  resp. 6,1; při přívodu vzduchu štěrbinou se prodloužil na  $x/b = 13,6$  resp. 7,8; u přívodu dírkami došlo k prodloužení na  $x/b = 14,3$  resp. 8,0 a při použití trubiček pro přívod vzduchu na  $x/b = 15,3$  resp. 8,2.



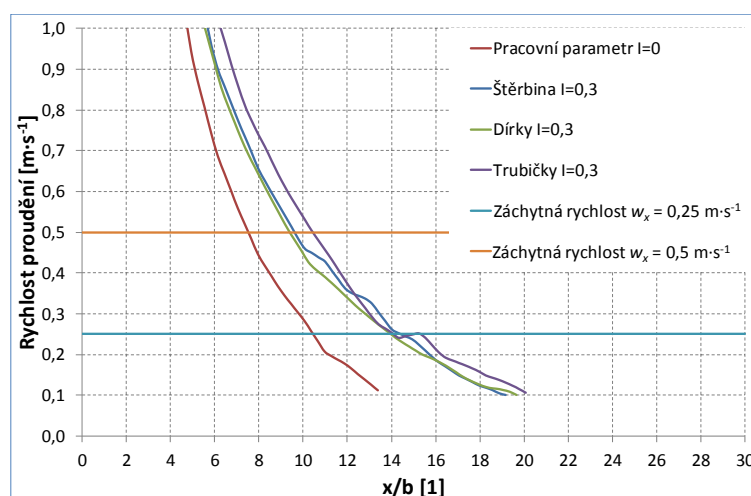
Obr. 6.17 – Porovnání rychlostí proudění v ose odsávací štěrby s přepážkou v úrovni horní hrany příruby s pracovním parametrem  $I = 0$  a 0,9

Celkově bylo dosahováno nejlepších výsledků účinnosti odsávání v ose odsávací štěrby s přepážkou v úrovni horní hrany příruby, pokud bylo využito pro přívod vzduchu trubiček a dírek.

## 6.9 Porovnání rychlostí v ose odsávací štěrbině s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbině

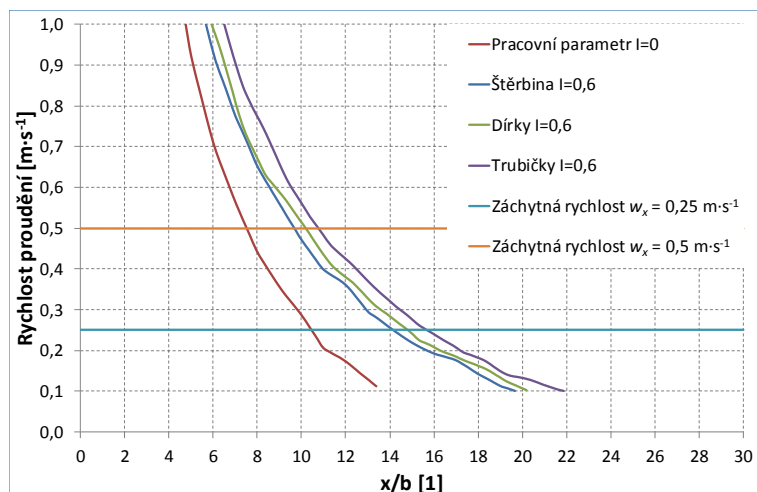
Výsledky porovnání rychlostí v ose odsávací štěrbině tradičního a zesíleného štěrbinového sacího nástavce v konfiguraci s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbině, při použití jednotlivých typů přívodu vzduchu (štěrbinou, dírkami, trubičkami) a pro pracovní parametry  $I = 0,3$ ;  $0,6$  a  $0,9$  lze nalézt v obr. 6.18, obr. 6.19 a obr. 6.20.

Při nastavení pracovního parametru na hodnotu  $I = 0,3$  lze pozorovat větší dosah oblasti účinného odsávání oproti tradičnímu sacímu nástavci u všech použitých variant zesíleného odsávání pro obě zkoumané záchytné rychlosti ( $w_x = 0,25$  a  $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). U tradičního odsávání je dosah účinné oblasti  $x/b = 10,5$  resp.  $7,5$ ; při přívodu vzduchu štěrbinou se prodloužil na  $x/b = 14,4$  resp.  $9,6$ ; u přívodu dírkami došlo k prodloužení na  $x/b = 14,0$  resp.  $9,4$  a při použití trubiček pro přívod vzduchu na  $x/b = 15,3$  resp.  $10,4$ .



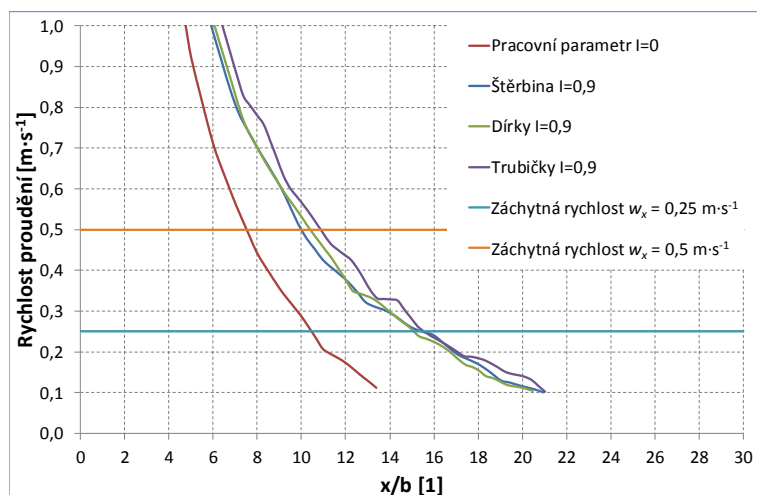
Obr. 6.18 – Porovnání rychlostí proudění v ose odsávací štěrbině s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbině s pracovním parametrem  $I = 0$  a  $0,3$

Nastavením pracovního parametru na hodnotu  $I = 0,6$  se opět více projeví rozdíly mezi jednotlivými typy přívodu vzduchu. U tradičního odsávání je dosah účinné oblasti  $x/b = 10,5$  resp.  $7,5$ ; při přívodu vzduchu štěrbinou se prodloužil na  $x/b = 14,2$  resp.  $9,7$ ; u přívodu dírkami došlo k prodloužení na  $x/b = 14,8$  resp.  $10,2$  a při použití trubiček pro přívod vzduchu na  $x/b = 15,7$  resp.  $10,8$ . V porovnání s nastavením pracovního parametru na  $I = 0,3$  se všechny dosahy prodloužily kromě varianty s přívodem vzduchu štěrbinou, kdy došlo u záchytné rychlosti  $w_x = 0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  k malému poklesu této vzdálenosti.



Obr. 6.19 – Porovnání rychlostí proudění v ose odsávací štěrby s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby s pracovním parametrem  $I = 0$  a  $0,6$

Dalším zvýšením pracovního parametru na hodnotu  $I = 0,9$  došlo u všech variant zesíleného odsávání k dalšímu mírnému prodloužení účinné oblasti v ose odsávací štěrby pro obě záchytné rychlosti ( $w_x = 0,25$  a  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). U tradičního odsávání je dosah účinné oblasti  $x/b = 10,5$  resp.  $7,5$ ; při přívodu vzduchu štěrbinou se prodloužil na  $x/b = 15,5$  resp.  $10,0$ ; u přívodu dírkami došlo k prodloužení na  $x/b = 15,1$  resp.  $10,4$  a při použití trubiček pro přívod vzduchu  $x/b = 15,7$  resp.  $10,9$ . Lze pozorovat, že u varianty s přívodem vzduchu trubičkami již nedošlo k téměř žádnému nárůstu záchytné vzdálenosti v porovnání s nastavením pracovního parametru na  $I = 0,6$  ale při přívodu vzduchu štěrbinou došlo u záchytné rychlosti  $w_x = 0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  k největšímu prodloužení záchytné vzdálenosti. Avšak nejdelší záchytné vzdálenosti bylo dosaženo s přívodem vzduchu trubičkami.



Obr. 6.20 – Porovnání rychlostí proudění v ose odsávací štěrby s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby s pracovním parametrem  $I = 0$  a  $0,9$

Celkově bylo dosahováno nejlepších výsledků účinnosti odsávání v ose odsávací štěrby s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby, pokud bylo využito pro přívod vzduchu trubiček.

## 7 ENERGETICKÁ NÁROČNOST SACÍCH NÁSTAVCŮ

Energetická náročnost zkoumaného sacího nástavce s různými typy přívodu vzduchu a s přepážkou ve dvou polohách vůči sacímu nástavci byla zkoumána dvěma přístupy.

Nejdříve za pomoci měření příkonu ventilátorů přímo na měřicí trati, kdy naměřené příkony zahrnují celkové tlakové ztráty na použité měřicí trati (největší tlakové ztráty způsobují plovákové průtokoměry a vířič). V reálném provozu budou tedy výsledné příkony odlišné, protože nebude nutné použít tak výkonné ventilátory.

V druhém přístupu bylo pro porovnání použito vypočítaného ztrátového příkonu viz rov. (1.14), nutného pro překonání tlakových ztrát a vytvoření potřebného dynamického tlaku na zesíleném sacím nástavci.

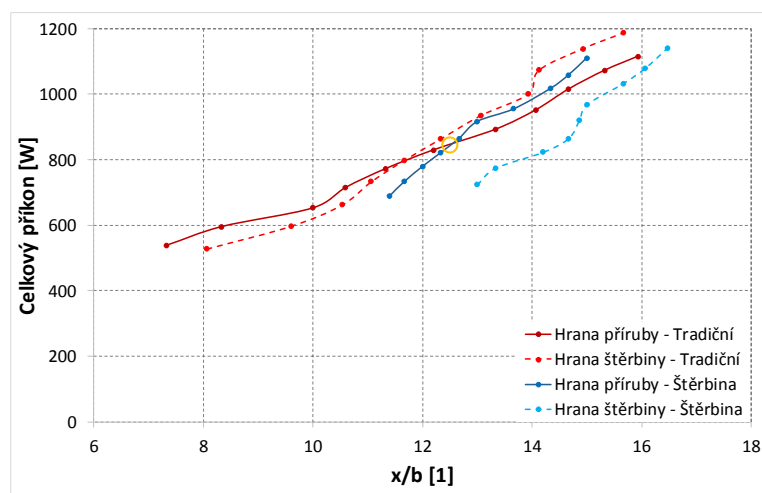
V obou přístupech je vyhodnocován celkový příkon, resp. ztrátový příkon při tradičním odsávání a zesíleném odsávání s pracovním parametrem  $I = 0,6$  v závislosti na záchytné vzdálenosti v ose odsávací šterbiny pro záchytnou rychlost  $w_x = 0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . V uvedených grafech jsou naměřené, resp. vypočítané body pospojovány.

### 7.1 Energetická náročnost experimentálního zařízení

Porovnání měřeného příkonu ventilátorů při tradičním odsávání a zesíleném odsávání s přívodem vzduchu šterbinou v různých záchytných vzdálenostech v ose odsávací šterbiny při záchytné rychlosti  $w_x = 0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  je uvedeno v obr. 7.1.

Z výsledků lze vidět, že při odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany příruby vykazuje zesílené odsávání (s přívodem vzduchu šterbinou) do záchytné vzdálenosti  $x/b = 12,5$  nižší příkon než tradiční odsávání. Při požadavku na delší záchytnou vzdálenost vykazuje tradiční odsávání nižší příkon.

Při odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací šterbiny vykazuje zesílené odsávání v celém zkoumaném rozsahu záchytných vzdáleností nižší příkon než tradiční odsávání.

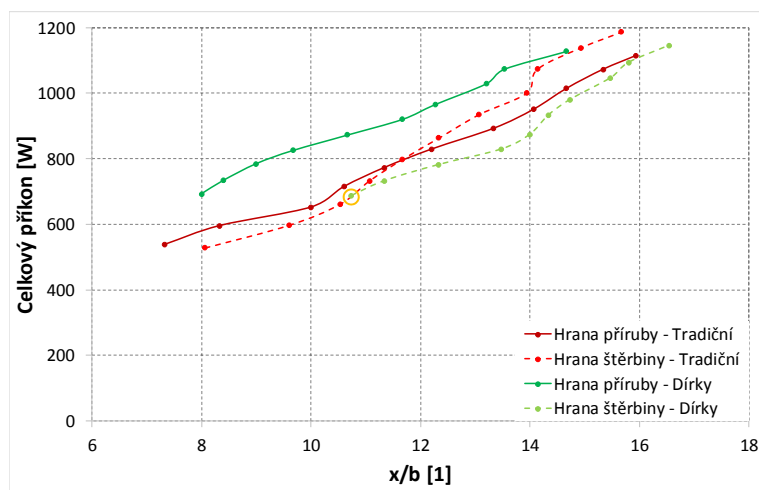


Obr. 7.1 – Závislost celkového měřeného příkonu (Tradiční – Šterbina) na poměrné záchytné vzdálenosti v ose odsávací šterbiny pro záchytnou rychlost  $0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Výsledky měřeného příkonu ventilátorů při tradičním odsávání a zesíleném odsávání s přívodem vzduchu dírkami v různých záchytných vzdálenostech v ose odsávací šterbiny při záchytné rychlosti  $w_x = 0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  je uvedeno v obr. 7.2.

Z výsledků lze vidět, že při odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany příruby vykazuje tradiční odsávání v celém zkoumaném rozsahu záchytných vzdáleností nižší příkon než zesílené odsávání (s přívodem vzduchu dírkami).

Při odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby vykazuje zesílené odsávání na svém minimálním nastavení (které dovozovaly průtokoměry) stejný příkon jako tradiční odsávání. Ve zbytku zkoumaného rozsahu záchytných vzdáleností již zesílené odsávání s přívodem vzduchu dírkami vykazuje nižší příkon než tradiční odsávání.

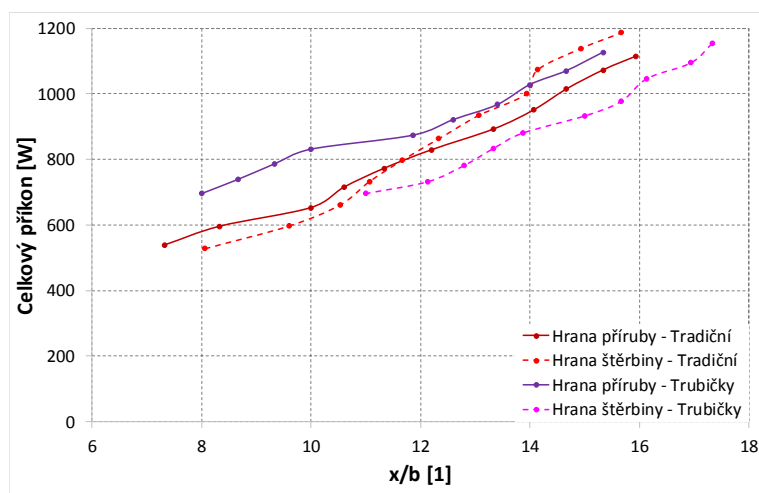


Obr. 7.2 – Závislost celkového měřeného příkonu (Tradiční – Dírky) na poměrné záchytné vzdálenosti v ose odsávací štěrby pro záchytnou rychlost  $0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Porovnání měřeného příkonu ventilátorů při tradičním odsávání a zesíleném odsávání s přívodem vzduchu trubičkami v různých záchytných vzdálenostech v ose odsávací štěrby při záchytné rychlosti  $w_x = 0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  je uvedeno v obr. 7.3.

Je patrné, že při odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany příruby vykazuje tradiční odsávání v celém zkoumaném rozsahu záchytných vzdáleností nižší příkon než zesílené odsávání (s přívodem vzduchu trubičkami).

Při odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby vykazuje zesílené odsávání v celém zkoumaného rozsahu záchytných vzdáleností nižší příkon než tradiční odsávání.

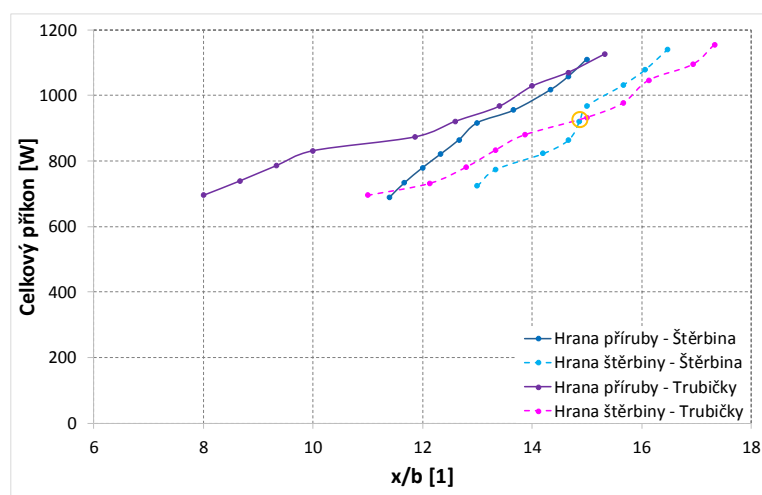


Obr. 7.3 – Závislost celkového měřeného příkonu (Tradiční – Trubičky) na poměrné záchytné vzdálenosti v ose odsávací štěrby pro záchytnou rychlost  $0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Porovnání měřeného příkonu ventilátorů při zesíleném odsávání s přívodem vzduchu štěrbinou a při zesíleném odsávání s přívodem vzduchu trubičkami v různých záchytných vzdálenostech v ose odsávací štěrbiny při záchytné rychlosti  $w_x = 0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  je uvedeno v obr. 7.4.

Je patrné, že při odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany příruby vykazuje zesílené odsávání s přívodem vzduchu štěrbinou v téměř celém zkoumaném rozsahu záchytných vzdáleností nižší příkon než zesílené odsávání s přívodem vzduchu trubičkami.

Při odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbiny vykazuje zesílené odsávání s přívodem vzduchu štěrbinou do záchytné vzdálenosti  $x/b = 14,9$  nižší příkon než zesílené odsávání s přívodem vzduchu trubičkami. Při požadavku na delší záchytnou vzdálenost vykazuje zesílené odsávání s přívodem vzduchu trubičkami nižší příkon.



Obr. 7.4 – Závislost celkového měřeného příkonu (Štěrbinou – Trubičky) na poměrné záchytné vzdálenosti v ose odsávací štěrbiny pro záchytnou rychlost  $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

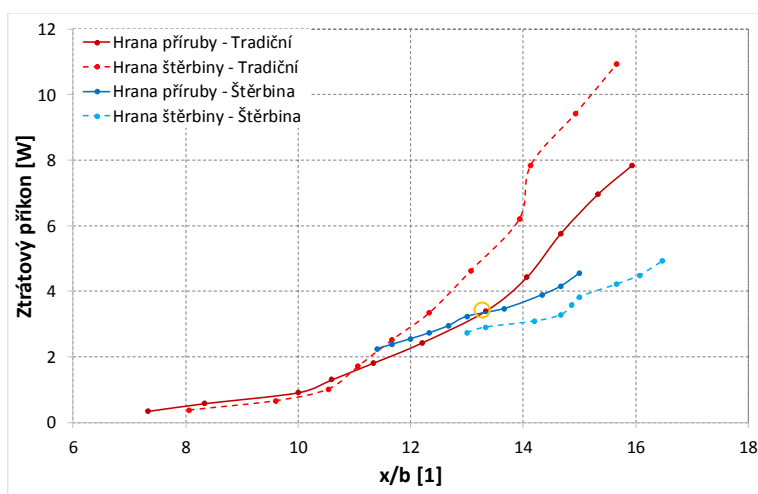


## 7.2 Energetická náročnost sacího nástavce

Porovnání vypočítaného ztrátového příkonu nutného (dle rov. (1.14)) pro překonání tlakových ztrát a vytvoření potřebného dynamického tlaku při tradičním odsávání a zesíleném odsávání s přívodem vzduchu štěrbinou v různých záchytných vzdálenostech v ose odsávací štěrby při záchytné rychlosti  $w_x = 0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  je uvedeno v obr. 7.5.

Z výsledků lze vidět, že při odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany příruby vykazuje tradiční odsávání do záchytné vzdálenosti  $x/b = 13,3$  nižší ztrátový příkon než zesílené odsávání s přívodem vzduchu štěrbinou. Při požadavku na delší záchytnou vzdálenost vykazuje již zesílené odsávání nižší ztrátový příkon.

Při odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby vykazuje zesílené odsávání s přívodem vzduchu štěrbinou v celém zkoumaném rozsahu záchytných vzdáleností nižší ztrátový příkon než tradiční odsávání.



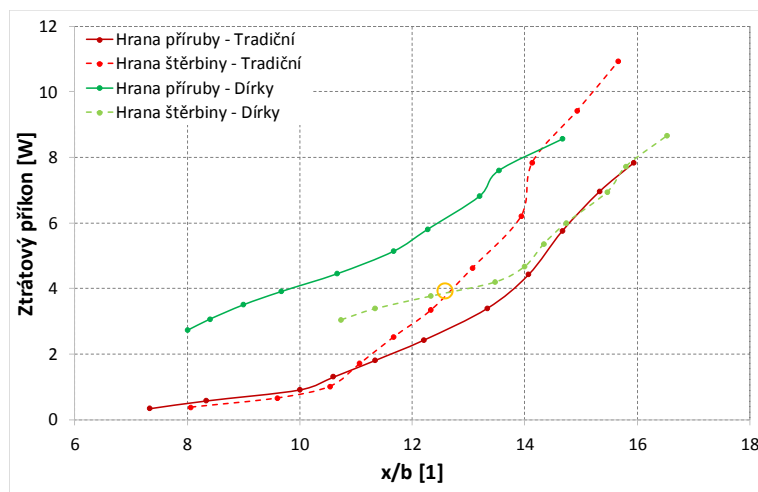
Obr. 7.5 – Závislost ztrátového příkonu sacího nástavce (Tradiční – Štěrba) na poměrné záchytné vzdálenosti v ose odsávací štěrby pro záchytnou rychlost  $0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Výsledky vypočítaného ztrátového příkonu při tradičním odsávání a zesíleném odsávání s přívodem vzduchu dírkami v různých záchytných vzdálenostech v ose odsávací štěrby při záchytné rychlosti  $w_x = 0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  je uvedeno v obr. 7.6.

Z výsledků lze vidět, že při odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany příruby vykazuje tradiční odsávání v celém zkoumaném rozsahu záchytných vzdáleností nižší ztrátový příkon než zesílené odsávání s přívodem vzduchu dírkami.

Při odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby vykazuje tradiční odsávání do záchytné vzdálenosti  $x/b = 12,7$  nižší ztrátový příkon než zesílené odsávání s přívodem vzduchu dírkami. Při požadavku na delší záchytnou vzdálenost vykazuje již zesílené odsávání nižší ztrátový příkon.



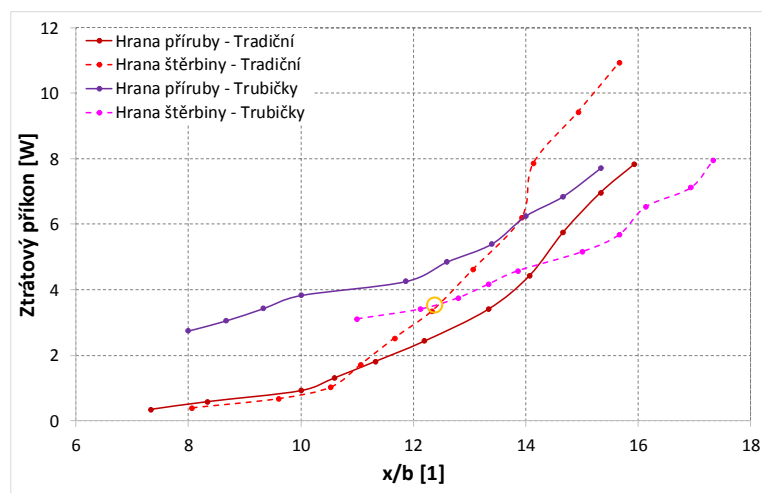


Obr. 7.6 – Závislost ztrátového příkonu sacího nástavce (Tradiční – Dírky) na poměrné záchytné vzdálenosti v ose odsávací štěrby pro záchytnou rychlost  $0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Porovnání vypočítaného ztrátového příkonu při tradičním odsávání a zesíleném odsávání s přívodem vzduchu trubičkami v různých záchytných vzdálenostech v ose odsávací štěrby při záchytné rychlosti  $w_x = 0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  je uvedeno v obr. 7.7.

Je patrné, že při odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany příruby vykazuje tradiční odsávání v celém zkoumaném rozsahu záchytných vzdáleností nižší ztrátový příkon než zesílené odsávání s přívodem vzduchu trubičkami.

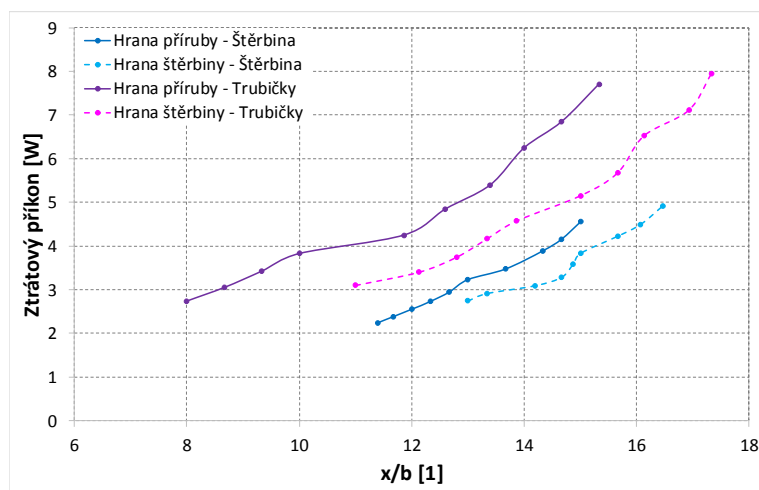
Při odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby vykazuje tradiční odsávání do záchytné vzdálenosti  $x/b = 12,5$  nižší ztrátový příkon než zesílené odsávání s přívodem vzduchu trubičkami. Při požadavku na delší záchytnou vzdálenost vykazuje již zesílené odsávání nižší ztrátový příkon.



Obr. 7.7 – Závislost ztrátového příkonu sacího nástavce (Tradiční – Trubičky) na poměrné záchytné vzdálenosti v ose odsávací štěrby pro záchytnou rychlost  $0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Porovnání vypočítaného ztrátového příkonu při zesíleném odsávání s přívodem vzduchu štěrbinou a při zesíleném odsávání s přívodem vzduchu trubičkami v různých záchytných vzdálenostech v ose odsávací štěrby při záchytné rychlosti  $w_x = 0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  je uvedeno v obr. 7.8.

Je patrné, že při odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany příruby i v úrovni horní hrany odsávací štěrbiny vykazuje zesílené odsávání s přívodem vzduchu štěrbinou v celém zkoumaném rozsahu záchytných vzdáleností nižší příkon než zesílené odsávání s přívodem vzduchu trubičkami, což je způsobeno většími tlakovými ztrátami v přívodu vzduchu trubičkami. Turbulizací přiváděného vzduchu je ale dosaženo větších účinností odsávání v účinné oblasti. Je tedy třeba zvážit získané výhody v porovnání s větší energetickou náročností.



Obr. 7.8 – Závislost ztrátového příkonu sacího nástavce (Štěrbiná– Trubičky) na poměrné záchytné vzdálenosti v ose odsávací štěrbiny pro záchytnou rychlost  $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Přívod vzduchu dírkami již s přívodem vzduchu štěrbinou nebyl porovnán, protože z výsledků měření účinnosti sice vyšlo, že je účinnosti odsávání srovnatelná nebo v některých případech lepší oproti přívodu vzduchu trubičkami, ale z výsledků vizualizace proudění bylo patrné, že účinná oblast bude užší, než je šířka odsávací štěrbin, protože přívodní proud měl nevhodný tvar. Pokud by se provedly úpravy pro zrovnoměnění proudění z přívodních dírek, došlo by k dalšímu zvětšení tlakových ztrát a tím zvětšení ztrátového příkonu.

## 8 NEJISTOTY MĚŘENÍ

Nejistota měření je parametr, který souvisí s výsledkem měření, protože vymezuje interval, ve kterém s určitou pravděpodobností předpokládá výskyt skutečně naměřené hodnoty.

Dle matematické definice je možné nejistoty rozdělit podle toho, zda se jedná o nejistoty absolutní nebo relativní.

Absolutní nejistoty lze definovat dle vztahu (Pavelek a Štětina 2007):

$$\varepsilon = y - y^*, \quad (8.1)$$

kde:

$\varepsilon$	[jednotka <sup>11</sup> ]	– absolutní nejistota,
$y$	[jednotka]	– naměřená hodnota,
$y^*$	[jednotka]	– předpokládaná skutečná hodnota.

Relativní nejistoty je možné definovat jako (Pavelek a Štětina 2007):

$$\delta = \frac{\varepsilon}{y^*}, \quad (8.2)$$

kde:

$\delta$	[1]	– relativní nejistota.
----------	-----	------------------------

### 8.1 Nejistoty přímých měření

Nejistoty přímých měření spočívají v přímém odečtu hodnoty měřené veličiny na měřicím přístroji, aniž by se musel provádět výpočet dle závislosti měřené veličiny na veličinách jiného druhu (Sládek a Vdoleček 1992).

Nejistoty lze rozdělit na nejistoty typu A – nejistoty opakovaných měření (zejména při měřeních kdy dochází k fluktuacím měřených veličin např. rychlosti proudění, koncentrace, ...). Tato nejistota může také sloužit k určení turbulence. Nejistoty typu B – nejistoty přístroje a kombinovaná nejistota typu C.

#### 8.1.1 Nejistoty typu A

Určení nahodilých nejistot spočívá v zákonech statistické analýzy. Nejčastěji se k popisu těchto nejistot používá tzv. výběrová směrodatná odchylka, pro kterou platí, že 68,3 % hodnot naměřených na stejném objektu, stejným přístrojem by mělo spadat do tolerančního pole  $\pm \sigma$  kolem nejpravděpodobnější hodnoty  $y^*$ . Hodnota  $\kappa = 3 \cdot \sigma$  je krajní odchylka, často je totožná s největší dovolenou nejistotou přístrojů, což je hodnota uváděná výrobcem (Pavelek a Štětina 2007).

Pro výběrovou směrodatnou odchylku jednotlivých opakovaných měření platí vztah (Pavelek a Štětina 2007):

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}}, \quad (8.3)$$

kde:

$\sigma_A$	[jednotka]	– výběrová směrodatná odchylka,
------------	------------	---------------------------------

---

<sup>11</sup> Jednotka zkoumané proměnné

$y_i$	[jednotka]	– naměřená hodnota i-tého měření,
$\bar{y}$	[jednotka]	– průměrná hodnota z naměřených hodnot,
$n$	[1]	– počet opakovaných měření.

Výběrová směrodatná odchylka aritmetického průměru opakovaných měření je dána vztahem (Pavelek a Štětina 2007):

$$\bar{\sigma}_A = \frac{\sigma_A}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}{n \cdot (n - 1)}}, \quad (8.4)$$

kde:

$\bar{\sigma}_A$  [jednotka] – výběrová směrodatná odchylka aritmetického průměru.

### 8.1.2 Nejistoty typu B

Nejistoty typu B u přímých měření jsou dány vztahem (Pavelek a Štětina 2007):

$$\sigma_B = \frac{\kappa}{3}, \quad (8.5)$$

kde:

$\sigma_B$  [jednotka] – nejistota typu B u přímých měření,

$\kappa$  [jednotka] – dovolená nejistota přístroje – krajní odchylka.

Nejistotu přístroje lze vyjádřit pomocí tzv. třídy přesnosti, ta je definována vztahem (Pavelek a Štětina 2007):

$$T_p = \frac{\kappa}{Y} \cdot 100, \quad (8.6)$$

kde:

$T_p$  [%] – třída přesnosti,

$Y$  [jednotka] – měřicí rozsah přístroje.

### 8.1.3 Nejistoty typu C

Kombinovaná nejistota typu C zahrnuje „dohromady“ nejistotu typu A i B a platí pro ni vztah:

$$\sigma_C = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2}, \quad (8.7)$$

kde:

$\sigma_C$  [1] – kombinovaná nejistota typu C.

## 8.2 Nejistoty nepřímých měření

Nejistoty nepřímých měření nezávislých veličin jsou funkcí nejistot jednotlivých veličin, ze kterých je výsledná veličina počítána. Je-li výsledná veličina  $y$  funkcí veličin  $a, b, c, \dots$ , je možné výslednou směrodatnou odchylku určit dle vztahu (Pavelek a Štětina 2007):

$$\sigma_{y,C} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a} \cdot \sigma_{a,C}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b} \cdot \sigma_{b,C}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial c} \cdot \sigma_{c,C}\right)^2 + \dots}, \quad (8.8)$$

kde:

$\sigma_{y,C}$	[jednotka]	– směrodatná odchylka typu C veličiny $y$
$\sigma_{a,C}$	[jednotka]	– směrodatná odchylka typu C veličiny $a$ ,
$\sigma_{b,C}$	[jednotka]	– směrodatná odchylka typu C veličiny $b$ ,
$\sigma_{c,C}$	[jednotka]	– směrodatná odchylka typu C veličiny $c$ .

## 8.3 Nejistoty měření experimentálního zařízení

### 8.3.1 Nejistoty měření teploty

Teploty byly měřeny pomocí termočlánků typu T. Tento typ termočlánku má měřicí rozsah  $Y_t = 500 \text{ }^\circ\text{C}$  a třídu přesnosti  $T_{p,t} = 0,1 \text{ } \%$ .

Dosazením do rovnic (8.3), (8.5), (8.6) a (8.7) je možné vypočítat průměrné kombinované nejistoty měření teplot, které jsou poté pro:

- teplotu vzduchu v odsávacím potrubí před průtokoměrem:  $\bar{\sigma}_{t_{1od},C} = 0,183 \text{ K}$ ,
- teplotu vzduchu v příváděcím potrubí před průtokoměrem:  $\bar{\sigma}_{t_{1př},C} = 0,185 \text{ K}$ ,
- teplotu příváděného vzduchu v ústí šterbinové výustky:  $\bar{\sigma}_{t_{2př},C} = 0,184 \text{ K}$ ,
- teplotu okolí:  $\bar{\sigma}_{t_{ok},C} = 0,187 \text{ K}$ .

### 8.3.2 Nejistoty měření barometrického tlaku

Barometrický tlak byl měřen přístrojem Comet T7418 s rozsahem  $Y_{pb} = 50\,000 \text{ Pa}$ . Přesnost uváděná výrobcem je větší než  $T_{p,pb} = 0,3 \text{ } \%$  z rozsahu.

Dosazením do rovnic (8.3), (8.5), (8.6) a (8.7) je možné vypočítat průměrnou kombinovanou nejistotu měření barometrického tlaku  $\bar{\sigma}_{p_b,C} = 50,1 \text{ Pa}$ ,

### 8.3.3 Nejistoty měření tlakové difference

Diferenční tlak v odsávací části, resp. příváděcí části nástavce byl měřen pomocí Multifunkčního měřicího přístroje Testo 435 s rozsahem je  $0 - 2,5 \text{ kPa}$ . Výrobce uvádí dovolenou nejistotu přístroje na  $\kappa = 2 \text{ Pa}$  v rozsahu  $0$  do  $+200 \text{ Pa}$  a ve zbývajícím rozsahu  $\kappa = 1 \text{ } \%$  z naměřené hodnoty.

Dosazením do rovnic (8.3), (8.5), (8.6) a (8.7) je možné vypočítat průměrné kombinované nejistoty měření tlaku, které jsou poté pro:

- diferenční tlak v odsávací části nástavce:  $\bar{\sigma}_{\Delta p_{od},C} = 2,3 \text{ Pa}$ ,
- diferenční tlak v příváděcí části nástavce:  $\bar{\sigma}_{\Delta p_{př},C} = 2,4 \text{ Pa}$ .

### 8.3.4 Nejistoty měření tlaku před průtokoměry

Tlak v měřicí trati byl měřen pomocí tří převodníků tlaku PTLN-K s lineární charakteristikou. První převodník měřil podtlak v odsávací větvi před průtokoměrem a jeho rozsah je 0 – 2,5 kPa. Druhý převodník měřil přetlak před průtokoměrem v příváděcí větvi a má rozsah 0 – 20 kPa. Třetí převodník měřil tlak stopového plynu před průtokoměrem, tento převodník není zahrnut do nejistot měření, protože byla měřena přímo referenční koncentrace stopového plynu. Výrobce udává dovolenou nejistotu u všech převodníků na  $\kappa = 0,5 \%$  z naměřené hodnoty.

Dosazením do rovnic (8.3), (8.5) a (8.7) je možné vypočítat průměrné kombinované nejistoty měření tlaku, které jsou poté pro:

- podtlak vzduchu v odsávacím potrubí před průtokoměrem:  $\bar{\sigma}_{p_{1od},C} = 8,7 \text{ Pa}$ ,
- přetlak vzduchu v příváděcím potrubí před průtokoměrem:  $\bar{\sigma}_{p_{1př},C} = 24,0 \text{ Pa}$ .

### 8.3.5 Nejistoty absolutních tlaků před průtokoměry

Nejistoty absolutního tlaku jsou případem nepřímého měření, kdy pro absolutní tlak odsávaného vzduchu před průtokoměrem platí rovnice (3.4) resp (3.7) pro absolutní tlak přiváděného vzduchu před průtokoměrem.

Dosazením do rovnice (8.8) je možné určit průměrné kombinované nejistoty absolutního tlaku, které jsou poté pro:

- absolutní tlak vzduchu v odsávacím potrubí před průtokoměrem:  $\bar{\sigma}_{p_{1aod},C} = 50,9 \text{ Pa}$ ,
- absolutní tlak vzduchu v příváděcím potrubí před průtokoměrem:  $\bar{\sigma}_{p_{1apř},C} = 56,5 \text{ Pa}$ .

### 8.3.6 Nejistoty měření průtoku přiváděného a odsávaného vzduchu

Plovákový průtokoměr MFE 80 použitý v odsávací větvi má rozsah  $Y_{\dot{V}_{ood}} = 245 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  a dovolenou nejistotu  $\kappa_{\dot{V}_{ood}} = 4 \%$  z rozsahu. A plovákový průtokoměr MFE 40 v příváděcí větvi má rozsah  $Y_{\dot{V}_{opř}} = 66 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  a dovolenou nejistotu  $\kappa_{\dot{V}_{opř}} = 4 \%$  z rozsahu.

Dosazením do rovnic (8.3), (8.5) a (8.7) je možné vypočítat průměrné kombinované nejistoty.

Určení skutečného objemového průtoku vzduchu je ale prováděno nepřímou metodou dle rovnice (3.5) pro odsávaný vzduch resp. (3.8) pro přiváděný vzduch.

Kombinovaná nejistota skutečného objemového průtoku vzduchu je stanovena dosazením do rovnice (8.8) a její úpravou do tvaru:

$$\sigma_{\dot{V}_{1,C}} = \sqrt{\left( \left( \sqrt{\frac{p_0 \cdot T_1}{p_{1a} \cdot T_0}} \cdot \sigma_{\dot{V}_{0,C}} \right)^2 + \left( \frac{\dot{V}_0 \cdot p_0}{2 \cdot p_{1a} \cdot T_0 \cdot \sqrt{\frac{p_0 \cdot T_1}{p_{1a} \cdot T_0}}} \cdot \sigma_{t_{1,C}} \right)^2 + \left( - \frac{\dot{V}_0 \cdot p_0 \cdot T_1}{2 \cdot p_{1a}^2 \cdot T_0 \cdot \sqrt{\frac{p_0 \cdot T_1}{p_{1a} \cdot T_0}}} \cdot \sigma_{p_{1a,C}} \right)^2 \right)} \quad (8.9)$$

Průměrné kombinované nejistoty skutečného objemového průtoku vzduchu jsou poté pro:

- odsávaný vzduchu:  $\bar{\sigma}_{\dot{V}_{1od,C}} = 3,655 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ,
- přiváděný vzduch:  $\bar{\sigma}_{\dot{V}_{1př,C}} = 0,994 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

### 8.3.7 Nejistoty měření rozměrů přiváděcí a odsávací štěrby

Rozměry přiváděcí a odsávací štěrby byly měřeny opakovaně celkem 10×.

Šířky štěrbin byly měřeny digitálním posuvným měřidlem, u kterého výrobce udává dovolenou nejistotu  $\kappa_s = 0,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ .

Délky štěrbin byly měřeny posuvným měřidlem, jehož dovolená nejistota je dle výrobce  $\kappa_l = 0,9 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ .

Tab. 8.1 – Hodnoty opakovaných měření rozměrů přiváděcí a odsávací štěrby

	Pořadí měření									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
<i>s</i>	3,92	4,23	4,02	3,98	4,14	4,07	4,35	4,26	3,92	4,02
<i>l<sub>př</sub></i>	325,31	325,05	325,19	324,92	325,10	324,98	325,11	325,17	324,97	325,14
<i>b</i>	15,12	15,22	14,92	15,05	15,31	15,10	14,96	15,09	15,15	15,02
<i>l<sub>od</sub></i>	320,12	320,25	320,05	320,08	319,91	320,17	319,95	320,08	320,17	320,14

Dosazením do rovnic (8.3), (8.5) a (8.7) je možné stanovit kombinované nejistoty rozměrů, které jsou poté pro:

- šířku přiváděcí štěrby:  $\sigma_{s,C} = 0,149 \text{ mm}$ ,
- délku přiváděcí štěrby:  $\sigma_{l_{př,C}} = 0,121 \text{ mm}$ ,
- šířku odsávací štěrby:  $\sigma_{b,C} = 0,117 \text{ mm}$ ,
- délku odsávací štěrby:  $\sigma_{l_{od,C}} = 0,107 \text{ mm}$ .

### 8.3.8 Nejistoty nastavení pracovního parametru *I*

Pracovní parametr je počítán z rovnice (3.13), jedná se tedy o metodu nepřímého měření.

Nejistota typu C pracovního parametru *I* může být stanovena dosazením do rovnice (8.8) a její úpravou do tvaru:

$$\sigma_{I,C} = \sqrt{\left(2 \cdot \frac{I}{p_{1apř}} \cdot \sigma_{p_{1apř,C}}\right)^2 + \left(2 \cdot \frac{I}{\dot{V}_{1př}} \cdot \sigma_{\dot{V}_{1př,C}}\right)^2 + \left(\frac{I}{T_{2př}} \cdot \sigma_{t_{2př,C}}\right)^2 + \left(\frac{I}{b} \cdot \sigma_{b,C}\right)^2 + \left(\frac{I}{l_{od}} \cdot \sigma_{l_{od,C}}\right)^2 + \left(2 \cdot \frac{I}{T_{1od}} \cdot \sigma_{t_{1od,C}}\right)^2 + \left(-2 \cdot \frac{I}{p_{1aod}} \cdot \sigma_{p_{1aod,C}}\right)^2 + \left(-2 \cdot \frac{I}{\dot{V}_{1od}} \cdot \sigma_{\dot{V}_{1od,C}}\right)^2 + \left(-\frac{I}{T_{2od}} \cdot \sigma_{t_{2od,C}}\right)^2 + \left(-\frac{I}{s} \cdot \sigma_{s,A}\right)^2 + \left(-\frac{I}{l_{př}} \cdot \sigma_{l_{př,A}}\right)^2 + \left(-2 \cdot \frac{I}{T_{1př}} \cdot \sigma_{t_{1př,A}}\right)^2} \quad (8.10)$$

Průměrná kombinovaná nejistota nastavení pracovního parametru je  $\bar{\sigma}_{I,C} = 0,0383$ .

### 8.3.9 Nejistoty měření koncentrace CO<sub>2</sub> v odsávaném vzduchu

Koncentrace stopového plynu v odsávacím potrubí a v odsávacím potrubí při referenčním měření byla měřena analyzátozem plynů Multi-gas Monitor Type 1302. Výrobce tohoto přístroje garantuje dovolenou nejistotu přístroje  $\kappa_{C_{od}} = \kappa_{C_{od,ref}} = 1,7 \%$  z naměřené hodnoty.

Dosazením do rovnic (8.3), (8.5) a (8.7) je možné vypočítat průměrné kombinované nejistoty, které jsou poté pro:

- koncentraci stopového plynu v odsávaném vzduchu:  $\bar{C}_{od,C} = 43 \text{ ppm}$ ,
- koncentraci stopového plynu v odsávaném vzduchu odpovídající zachycení 100 % stopového plynu při referenčním měření:  $\bar{C}_{od,ref,C} = 9 \text{ ppm}$ .

### 8.3.10 Nejistoty měření koncentrace CO<sub>2</sub> na pozadí

Koncentrace stopového plynu na pozadí a koncentrace stopového plynu na pozadí při referenčním měření byly měřeny pomocí IAQ sondy připojené k přístroji Testo 435, pro který výrobce udává dovolenou nejistotu přístroje  $\kappa_{C_{poz}} = \kappa_{C_{poz,ref}} = 75 \text{ ppm} \pm 3 \%$  z naměřené hodnoty.

Dosazením do rovnic (8.3), (8.5) a (8.7) je možné vypočítat průměrné kombinované nejistoty pro:

- koncentraci stopového plynu na pozadí:  $\bar{C}_{poz,C} = 29 \text{ ppm}$ ,
- koncentraci stopového plynu na pozadí při referenčním měření:  $\bar{C}_{poz,ref,C} = 29 \text{ ppm}$ .

### 8.3.11 Nejistoty účinnosti odsávání

Účinnost odsávání je počítána z rovnice (3.15) po dosazení rovnice (3.16), jedná se tedy o metodu nepřímého měření.

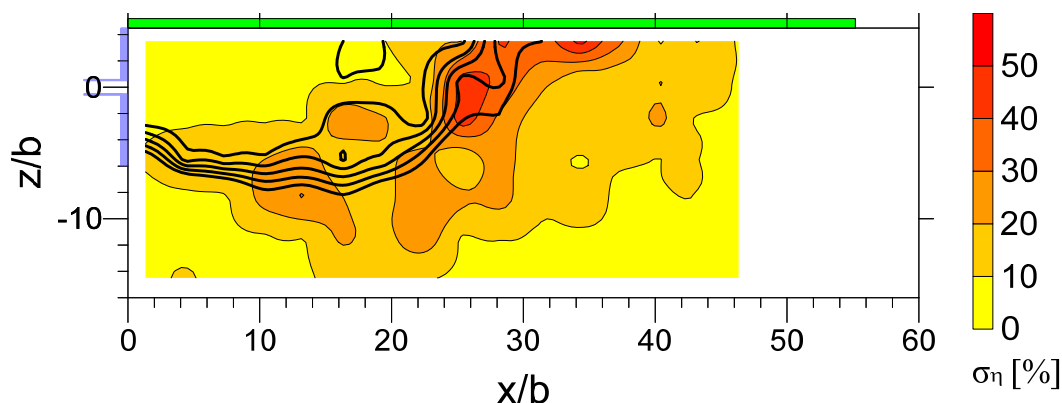
Nejistota typu C účinnosti odsávání může být tedy stanovena dosazením do rovnice (8.8) a její úpravou do tvaru:

$$\sigma_{\eta,C} = \sqrt{\left( \frac{1}{\bar{C}_{od,ref} - \bar{C}_{poz,ref}} \cdot \sigma_{\bar{C}_{od,C}} \right)^2 + \left( -\frac{1}{\bar{C}_{od,ref} - \bar{C}_{poz,ref}} \cdot \sigma_{\bar{C}_{poz,C}} \right)^2 + \left( -\frac{\bar{C}_{od} - \bar{C}_{poz}}{(\bar{C}_{od,ref} - \bar{C}_{poz,ref})^2} \cdot \sigma_{\bar{C}_{od,ref,C}} \right)^2 + \left( \frac{\bar{C}_{od} - \bar{C}_{poz}}{(\bar{C}_{od,ref} - \bar{C}_{poz,ref})^2} \cdot \sigma_{\bar{C}_{poz,ref,C}} \right)^2} \quad (8.11)$$

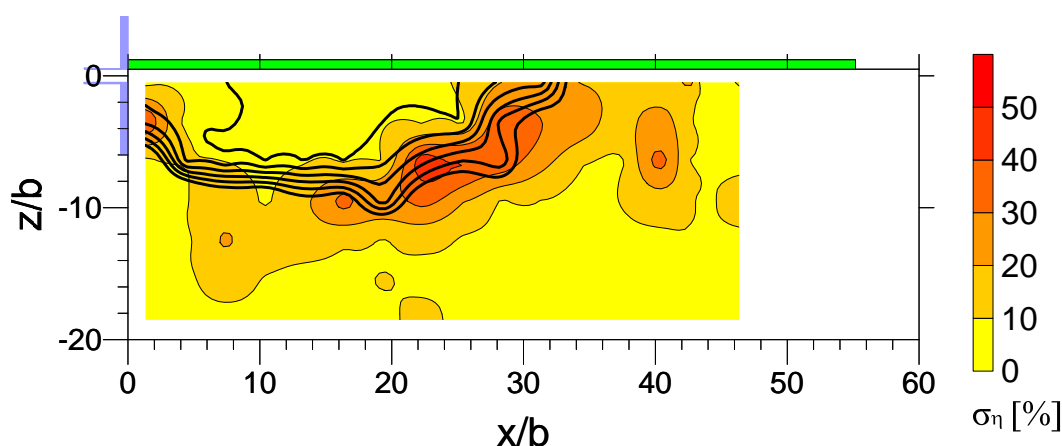
Průměrná kombinovaná nejistota účinnosti odsávání je  $\bar{\sigma}_{\eta,C} = 14,3 \%$ .

Rozložení průměrných nejistot vůči konturám průměrných účinností odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany příruby a horní hrany štěrbin jsou uvedeny na obr. 8.1 a obr. 8.2. Lze pozorovat, že největší nejistoty měření jsou na okraji oblasti účinného odsávání (v okolí poslední tučné kontury – 50% účinnosti odsávání). V této oblasti dochází k největšímu poklesu účinnosti a největším fluktuacím koncentrací.





Obr. 8.1 – Průměrné nejistoty a kontury průměrných účinností (tučně) s přepážkou v úrovni horní hrany příruby



Obr. 8.2 – Průměrné nejistoty a kontury průměrných účinností (tučně) s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbin

### 8.3.12 Nejistoty měření rychlostního pole

Pro měření rychlostního pole bylo použito osm termo-anemometrických sond připojených ke dvěma datalogerům Testo 454 ovládaným kontrolní jednotkou Testo 350 M/XL. Výrobce udává rozsah měření rychlosti  $Y_w = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a dovolenou nejistotu přístroje  $\kappa_w = 0,03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} + 5 \% \text{ z naměřené hodnoty}$ .

Dosazením do rovnic (8.3), (8.5) a (8.7) je možné vypočítat průměrnou kombinovanou nejistotu měření rychlosti proudění  $\bar{\sigma}_{w,C} = 0,038 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,

### 8.3.13 Nejistoty měření příkonu

Příkon byl měřen pomocí digitálního klešťového multifunkčního měřicího přístroje F407 od firmy Chauvin Arnoux. Výrobce přístroje uvádí přesnost  $T_{p,P} = 2 \% \text{ z naměřené hodnoty}$ .

Dosazením do rovnic (8.3), (8.5) a (8.7) je možné vypočítat průměrné kombinované nejistoty měření příkonu, které jsou poté pro:

- odsávací ventilátory  $\bar{\sigma}_{P_{od,C}} = 21,6 \text{ W}$ ,
- příváděcí ventilátor  $\bar{\sigma}_{P_{př,C}} = 9,9 \text{ W}$ .

## 9 ZÁVĚR

Práce se zabývá experimentálním výzkumem lokálního odsávacího systému, a to zejména zesíleného odsávacího systému tzv. REEXS. Práce navazuje na předchozí výzkumy a rozšiřuje je o výzkum zesíleného odsávání s pracovním stolem – přepážkou a škodlivinou chovající se vůči přepážce jako lehčí než vzduch při použití různých typů přívodu vzduchu pro zesílení (štěrbina, soustava dírek, soustava trubiček).

Teoretická část práce je rozdělena do dvou kapitol: první kapitola se zabývá základním popisem větrání pomocí Navierových-Stokesových rovnic, ze kterých lze odvodit Archimedovo číslo (použité pro popis chování škodliviny ve vzduchu) a ztrátový příkon na výustkách. Dále jsou zde rozebrány větrací systémy a vše je směřováno k lokálnímu odsávání a sacím nástavcům, konkrétně obdélníkovým sacím nástavcům včetně základních výpočtů rychlostí v ose nástavců. Je zde také rozebrán vliv příruby na proudové pole před sacími nástavci.

Ve druhé teoretické kapitole je uvedena obsáhlá literární rešerše zesíleného odsávacího systému seznamující s hlavními výsledky a závěry publikovaných prací. V této části je také uveden popis pracovního parametru  $I$  (poměr hybnostních toků přiváděného a odsávaného vzduchu) stanoveného Hyldgardem (Hyldgard 1987), který je využíván v celé této práci pro popis nastavení systému.

Třetí kapitola popisuje použitou měřicí trať upravenou na polo-automatizované měření, použité varianty zesíleného šterbinového sacího nástavce s popisem úprav původního přívodu vzduchu pomocí šterbiny na přívod vzduchu pomocí soustavy dírek a soustavy trubiček pro zvýšení turbulizace přívodního proudu. V kapitole je uveden také popis měřených konfigurací zesíleného sacího nástavce ve volném prostoru (měřené Bouzkem (Bouzek 2004) a uvedené pro porovnání) a s pracovním stolem – přepážkou v různých polohách vůči sacímu nástavci. Kapitola také uvádí popis měřicího systému včetně použitých vztahů, měření účinnosti metodou stopového plynu včetně výpočtu Archimedova čísla pro použitý stopový plyn. Dále je zde uveden popis měření rychlostních polí, vizualizaci kouřovou metodou, měření příkonu ventilátorů a měření tlakových ztrát.

Následuje kapitola popisující vizualizaci proudění, ve které byly pomocí kouřové metody vizualizovány přívodní proudy generované přívodní šterbinou, soustavou dírek a soustavou trubiček. Přívodní šterbina generovala přívodní proud s osou proudění mírně odkloněnou od přepážky a rozšířením pod úhlem  $28,1^\circ$  při bočním pohledu a při čelním pohledu mírně uhýbající vpravo. Soustava dírek generovala přívodní proud s osou proudění mírně odkloněnou k přepážce a velkým rozšířením pod úhlem  $52,3^\circ$  při bočním pohledu. Při čelním pohledu došlo k odklonu proudu ve směru od přívodů vzduchu, takže se vytvořilo proudění ve tvaru trojúhelníku. U přívodu vzduchu soustavou trubiček byl generován přívodní proud s osou proudění mírně odkloněnou k přepážce a rozšířením pod úhlem  $25,9^\circ$  při bočním pohledu. Při čelním pohledu byl generovaný proud rovnoměrný. Řešení s přívodem vzduchu dírkami je výrobně nenáročné, ale dle vizualizace při čelním pohledu nevhodné kvůli tvaru výstupního proudu.

Kapitola pátá uvádí výsledky měření účinnosti odsávání metodou stopového plynu. Z výsledků je patrné, že při použití pracovního stolu – přepážky a plynu se záporným Archimedovým číslem (s větší hustotou než okolní vzduch) je dosahováno více než dvojnásobných záhytných vzdáleností oproti variantě s odsáváním ve volném prostoru. Pro simulaci plynu s kladným Archimedovým číslem vůči přepážce byla přepážka umístěna do dvou různých poloh nad odsávací šterbinu. Nejlepších výsledků účinnosti odsávání v ose odsávací šterbiny s přepážkou v úrovni horní hrany příruby bylo dosahováno, pokud bylo využito pro přívod vzduchu šterbiny a soustavy dírek. Při odsávání s přepážkou umístěnou v úrovni horní hrany odsávací šterbiny bylo dosahováno vyšší účinnosti odsávání v ose

odsávací štěrby, pokud bylo využito pro přívod vzduchu dírek a trubiček i když účinná oblast nebyla vždy nejdelší.

Následující kapitola šestá porovnává výsledky měření rychlostních polí. Nejdelších oblastí účinného odsávání (oblast, ve které osová rychlost nepoklesla pod  $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  resp.  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) v ose odsávací štěrby s přepážkou v úrovni horní hrany příruby i s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby bylo dosahováno při odsávání s přívodem vzduchu soustavou trubiček a soustavou dírek.

V 7. kapitole byla energetická náročnost zvolených konfigurací zesíleného sacího nástavce s přepážkou zkoumána dvěma přístupy. Nejdříve byl měřen příkon ventilátorů přímo na měřicí trati. V reálném provozu budou ale výsledné příkony odlišné, protože nebude nutné použít tak výkonné ventilátory zejména pro překonání tlakových ztrát průtokoměrů a víříče. Proto byl uplatněn ještě druhý přístup, kdy bylo použito vypočítaného ztrátového příkonu (z Bernoulliho rovnice rozšířené o ztrátový příkon) nutného pro překonání tlakových ztrát a vytvoření potřebného dynamického tlaku na zesíleném sacím nástavci.

Z výsledků měření vyplývá, že v případě přepážky v úrovni horní hrany příruby je pro krátkou zachytnou vzdálenost do  $x/b = 12,5$  energeticky výhodnější použít štěrbinový zesílený sací nástavec s přívodem vzduchu štěrbinou, nad tuto vzdálenost vykazuje tradiční odsávání nižší příkon.

V případě přepážky v úrovni horní hrany odsávací štěrby vykazuje zesílené odsávání (všechny tři typy přívodu vzduchu) v celém zkoumaném rozsahu zachytných vzdáleností nižší spotřebu v porovnání s tradičním odsáváním. Zesílené odsávání s přívodem vzduchu štěrbinou vykazuje do zachytné vzdálenosti  $x/b = 14,9$  nižší příkon než zesílené odsávání s přívodem vzduchu trubičkami. Při požadavku na delší zachytnou vzdálenost (která je obvykle požadována vždy) vykazuje zesílené odsávání s přívodem vzduchu trubičkami nižší příkon.

Následuje poslední kapitola popisující nejistoty měření.

Měření metodou stopového plynu bylo časově náročné a i přes provedenou částečnou automatizaci – připojení průtokoměrů a ventilátorů k měřicímu PC a řízení jejich výkonu pomocí PI regulátoru. Také použití traverzovacího systému značně zjednodušilo měření a v neposlední řadě využití sondy IAQ pro měření stopového plynu na pozadí zrychlilo měření v jednom bodě na cca 1/3 původního času měření. Navíc bylo nutné věnovat čas přípravě jednotlivých experimentů, ustálení proudění a testovacím měřením. V průběhu měření docházelo také k selhávání techniky – došlo k závadě krokového motorku analyzátoru plynů, který byl nejdříve opraven a následně vyměněn za nový. Dále byly na všech třech vysokotlakých ventilátorech měněny uhlíkové kartáčky. Výrobce již ale dodával náhradu, která byla pravděpodobně tvrdší a brzy způsobila vyždření komutátorů, takže nakonec musely být všechny ventilátory vyměněny. Při vyždření komutátoru jednoho z motorů došlo také ke spálení elektronického regulátoru, který musel být vyměněn za nový.

Výsledky je tedy možné shrnout následovně: všechny varianty zesíleného odsávání dosahují lepších výsledků účinnosti odsávání než při tradičním odsáváním. Použitím štěrbinového zesíleného sacího nástavce s přívodem vzduchu trubičkami a přepážkou v úrovni odsávací štěrby při odsávání škodliviny s kladným Archimedovým číslem (nižší hustota) vykazoval tento systém vyšší účinnost odsávání v ose odsávací štěrby (až o 10 % dle pracovního parametru) v porovnání se zesíleným štěrbinovým odsávacím systémem s přívodem vzduchu štěrbinou. S přívodem vzduchu trubičkami bylo při měření rychlostí v ose odsávací štěrby a obou poloh přepážky dosahováno vyšších rychlostí, resp. větších zachytných vzdáleností při stejné zachytné rychlosti proudění. Nakonec při použití zesíleného sacího nástavce s přívodem vzduchu trubičkami a přepážkou v úrovni odsávací štěrby bylo dosaženo nižšího příkonu ventilátorů pro dosažení zachytné vzdálenosti větší než  $x/b = 14,9$ . U vypočítaného ztrátového příkonu již vycházel lépe přívod vzduchu štěrbinou díky nižší tlakové ztrátě. Přívod vzduchu dírkami byl výrobně levnější než přívodní trubičky, ale přívod

vzduchu dírkami nezajišťuje stejné parametry odsávání po celé délce štěrbinu díky nevhodnému tvaru přívodního proudu a v případě jeho úpravy pro zrovnoměnění proudění bude mít pak i jiný ztrátový příkon.

Závěrem lze konstatovat, že všechny cíle dizertační práce, vymezené na počátku studia a při státní doktorské zkoušce, byly zcela splněny. Za hlavní přínos práce je možné považovat především porovnání chování odsávacího systému s pracovním stolem – přepážkou pod sacím nástavcem při využití stopového plynu těžšího než vzduchu a při konfiguraci s přepážkou nad odsávací štěrbinou, kdy toto uspořádání modeluje pracovní stůl se škodlivinou lehčí než vzduch. Dále je přínosem práce posouzení vlivu přívodního proudu na rychlostní pole a na účinnost odsávání. A v neposlední řadě je dosaženým výsledkem také porovnání energetické náročnosti tradičního štěrbinového sacího nástavce se zesíleným štěrbinovým sacím nástavcem s různými typy přívodu vzduchu.

Dílčí výsledky práce byly rovněž součástí řešení následujících projektů, na nichž se autor během doktorského studia podílel jako:

- hlavní řešitel juniorského projektu specifického výzkumu VUT v Brně FSI-J-12-25 „*Experimentální výzkum proudových polí před zesíleným sacím nástavcem situovaným nad pracovním stolem*“ v roce 2012,
- spoluřešitel projektu specifického výzkumu VUT v Brně FSI-S-11-6 „*Komplexní modelování interakce člověka a prostředí v kabinách dopravních prostředků a obytných prostorách a návrhové nástroje (tzv. Human Centered Design)*“ v letech 2011-2013,
- spoluřešitel projektu GAČR 101/09/H050 „*Výzkum energeticky úsporných zařízení pro dosažení pohody vnitřního prostředí*“ v letech 2010-2012.

## 10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

AABERG, C. P. *Plant for ventilation of rooms, more particularly in stables*. USA. 3401621. Zapsáno 1968.

AABERG, C. P. *Method and apparatus for exhausting air from a limited zone*. USA. 4043257. Zapsáno 1977.

ACGIH. *Industrial Ventilation - A Manual of Recommended Practice*. 29. Cincinnati (USA): American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2016. ISBN 9781607260875.

ADVANTECH. *Manual - ADAMViewQuickStart\_V1.1*. 2007. Dostupné také z: [http://support.advantech.com.tw/support/DownloadSRDetail\\_New.aspx?SR\\_ID=1-1WWOTN&Doc\\_Source=Download](http://support.advantech.com.tw/support/DownloadSRDetail_New.aspx?SR_ID=1-1WWOTN&Doc_Source=Download)

BOUZEK, V. *Účinnost odsávání zesíleného štěrbinového sacího nástavce*. Brno: VUT v Brně, 2004, 50 s. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Janotková E.

BRACONNIER, R., D. THREBAUT, G. AUBERTIN, J. SERIEYS a J. MULLER. *Double flow device for the capture of contaminants*. Amsterdam: Elsevier, 1986.

BURGESS, W. A., M. J. ELLENBECKER a R. D. TREITMAN. *Ventilation for control of the work environment*. Second edition. New Jersey (USA): John Wiley & Sons, 2004, 427 s. ISBN 047109532X.

ČSN EN 1093-4+A1. *Bezpečnost strojních zařízení – Hodnocení emise nebezpečných látek šířitelných vzduchem – Část 4: Účinnost zachycení odsávacím zařízením – Metoda značených atomů*. 2008.

DALLAVALLE, J. M. *Exhaust hoods*. New York (USA): Industrial press, 1944.

DANTEC DYNAMICS. *StreamLine Pro Anemometer System* [online]. [cit. 2017-08-10]. Dostupné z: [https://www.dantecdynamics.com/docs/products-and-services/fluid-mechanics/cta/PI119\\_StreamLine\\_Pro\\_Anemometer\\_System.pdf](https://www.dantecdynamics.com/docs/products-and-services/fluid-mechanics/cta/PI119_StreamLine_Pro_Anemometer_System.pdf)

FLETCHER, B. Centreline velocity characteristics of rectangular unflanged hoods and slots under suction. *The Annals of Occupational Hygiene*, 1977, 141-146.

FLETCHER, B. Effect of flanges on the velocity in front of exhaust ventilation hoods. *Annals of Occupational Hygiene*. 1978, 21(3), 265-269. ISSN 00034878.

GOLDEN SOFTWARE. *A Basic Understanding of Surfer Gridding Methods – Part 1* [online]. 2017 [cit. 2017-08-10]. Dostupné z: <https://support.goldensoftware.com/hc/en-us/articles/231348728-A-Basic-Understanding-of-Surfer-Gridding-Methods-Part-1>

GOODFELLOW, H. a E. TAHTI. *Industrial Ventilation Design Guidebook*. San Diego: Academic Press, 2001. ISBN 0122896769.

GUBLER, D. *REEXS - Reinforced Exhaust System Optimization of Operating and Design Parameters*. Zurich, 2002. Dizertační práce. Swiss Federal Institute of Technology Zurich.

GUBLER, D. a A. MOSER. Reinforced Exhaust System: Evaluation of Optimized Operating Parameters using CFD. *Air Distribution in Rooms, Ventilation for Health and Sustainable Environment*. Amsterdam (Netherlands): Elsevier, 2000a, 645-650.

GUBLER, D. a A. MOSER. *Tuning of a Reinforced Extract System by Computational Fluid Dynamics*. Helsinki (Finland): Finnish Institute of Occupational Health, 2000b, 104–107.

GUBLER, D., A. MOSER, P. SPRECHER a T. RUEEGG. *Reinforced exhaust system: Local ventilation with enhanced capture range*. Monterey (USA), 2002.

GUBLER, D., A. MOSER, P. SPRECHER, T. RUEEGG a R. WEBER. REEXS (reinforced exhaust system): new approaches for industrial ventilation solutions. *Applied Environmental Science and Public Health*. 2003.

HØGSTED, P. *Air movements controlled by means of exhaustion*. International, Proceedings of Spaces, Conference on Air Distribution in Ventilated. Stockholm (Sweden), 1987.

KREJČÍ, V. *Reinforced exhaust systems investigation*. Brno, 2006. Dizertační práce. VUT v Brně. Školitel Pavelek M.

HUNT, G. R. *The fluid mechanics of the Aaberg exhaust hood*. Leeds (Anglie), 1994. Dizertační práce. The University of Leeds.

HUNT, G. R. a D. B. INGHAM. The fluid -mechanics of a 2-dimensional aaberg exhaust hood. *Annals of Occupational Hygiene*. 1992, **36**(5), 455-476. ISSN 00034878.

HUNT, G. R. a D. B. INGHAM. Long range exhaustion - A mathematical model for the axisymmetric air flow of a local exhaust ventilation hood assisted by a turbulent radial jet. *Annals of Occupational Hygiene*. 1996, **40**(2), 171-196. ISSN 00034878.

HUNT, G. R., X. WEN a D. B. INGHAM. *Jet assisted local exhaust ventilation – The effect of jet direction*. In Proceedings of the Roomvent. 2000.

HUŠÁK, J. *Výzkum štěrbínového zesíleného odsávacího systému v kombinaci s pracovním stolem*. Malásek, L. Brno: VUT v Brně, 2006, 59 s. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Malásek L.

HYLDGARD, C.E. *Aerodynamic control of exhaust*. In: Proceedings of the Room Vent 87. Stockholm, 1987.

CHYSKÝ, J. a K. HEMZAL. *Větrání a klimatizace*. Praha: Česká Matica technická, 1993, **3**. ISBN 8090157408.

JANEČEK, L. *Vliv odsávaného množství vzduchu na účinnost zesíleného odsávacího systému*. Brno, 2005, 44 s. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Malásek L.

JANOTKOVÁ, E. *Technika prostředí*. Brno: VUTUM, 1991, 201 s. ISBN 802140258X.

JANOTKOVÁ, E., M. PAVELEK a L. MALÁSEK. *Lokální odsávání zesíleným štěrbínovým sacím nástavcem*. 2004a.

JANOTKOVÁ, E., M. PAVELEK a L. MALÁSEK. *Reinforced Exhaust System with Slot Exhaust Hood*. 2004b.

JANOTKOVÁ, E., M. PAVELEK a L. MALÁSEK. *Studie proudění u zesíleného štěrbinového sacího nástavce*. 2008.

JANOTKOVÁ, E., O. PECH a M. PAVELEK. *Lokální odsávací zařízení - Zařízení pro testování a výzkum sacích nástavců*. Brno: VUT v Brně, 2011.

KOŘÁN, P. *LAO - průmyslové systémy, s.r.o.: Laserový nůž* [online]. 2013 [cit. 2017-08-10]. Dostupné z: [www.lao.cz/lao-info-49/vyvoj-ve-firme-lao---laserovy-nuz-a-lasercombiner-55](http://www.lao.cz/lao-info-49/vyvoj-ve-firme-lao---laserovy-nuz-a-lasercombiner-55)

KOŠNER, J. a V. KREJČÍ. *Measurements of Radial Jet Characteristics*. In: *Proceedings of Colloquium FLUID DYNAMICS 2005*, Praha, 2005, 91-92.

KOŠNER, J. a V. KREJČÍ. *Vliv geometrie nástavce na šíření radiálního proudu*. 2006.

KRAJČA, K. a E. JANOTKOVÁ. *CFD simulace vlivu proudění okolního prostředí na lokální odsávání*. 2003.

KRATOCHVÍLA, J. *Měření rozložení rychlosti a turbulence Aabergova sacího nástavce*. Brno, 2002, 46 s. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Krejčí V.

KREJČÍ, V. *Reinforced exhaust systems investigation*. Brno, 2006. Dizertační práce. VUT v Brně. Školitel Pavelek M.

KREJČÍ, V. a M. JÍCHA. *CFD modelling of the radially symmetric reinforced exhaust system (REEXS)*. 2001a.

KREJČÍ, V. a M. JÍCHA. *Numerical modeling of the aaberg exhaust hood with the use of RNG and LES turbulence models*. 2001b.

KREJČÍ, V. a M. JÍCHA. *Numerické modelování Aabergova sacího nástavce pomocí modelů turbulence k-e RNG a LES*. 2001c.

KREJČÍ, V. a M. JÍCHA. *Numerické a experimentální modelování Aabergova sacího nástavce*. 2002a.

KREJČÍ, V. a M. JÍCHA. *Numerické modelování sacího nástavce typu REEXS*. 2002b.

KREJČÍ, V., M. JÍCHA a M. PAVELEK. *Účinky radiálního proudu na funkci zesíleného odsávacího nástavce*. 2004.

KREJČÍ, V., M. JÍCHA a M. PAVELEK. *Aaberg exhaust hood - effect of obstacles*. 2005.

KREJČÍ, V., M. JÍCHA a M. PAVELEK. *Capture Efficiency of the Aaberg Exhaust Hood and its Variation with Spatial Arrangement*. 2006a.

KREJČÍ, V., M. JÍCHA a M. PAVELEK. *Non-isothermal pollution release and its effect on capture efficiency of a reinforced exhaust system*. 2006b.

KREJČÍ, V. a J. KOŠNER. *Computational modelling of radial jet induced flow*. In *Proceedings of the International Conference Experimental Fluid Mechanics 2006*, 2006, 103-108.

KREJČÍ, V. a J. KOŠNER. Secondary flow due to a radial jet. In: *Proceedings of the International Conference Experimental Fluid Mechanics 2007*, 2007, 64-70.

KREJČÍ, V. a J. KOŠNER. *Energy consumption of the Aaberg exhaust hood compared with a flanged hood*. 2008a.

KREJČÍ, V. a J. KOŠNER. Large eddy simulation of a radial jet. In: *Proceedings of the International Conference Experimental Fluid Mechanics 2008*, 2008b, 91-97.

KREJČÍ, V. a J. KOŠNER. *Industrial ventilation - the way to optimum performance*. 2009.

KREJČÍ, V. a J. KOŠNER. *Optimalizace průmyslového větrání použitím Aabergova odsávacího nástavce*. 2011.

KREJČÍ, V., J. KOŠNER, T. PEČIVA a M. KAPLAN. *Flow pattern generated by a radial jet*. 2006c.

KREJČÍ, V., J. KOŠNER, T. PEČIVA a M. KAPLAN. *Radiální proud a jeho charakteristiky*. 2006d.

KREJČÍ, V., S. PATOČKA a M. JÍCHA. *CFD modeling of a reinforced exhaust system (REEXS) and comparison with tracer gas measurements*. 2002.

KULMALA, I. *Jet enhanced exhaust hood*. 1998.

MALÁSEK, L. *Návrh přestavby vzduchotechnického zařízení zesíleného odsávacího systému*. Brno, 2003, 63 s. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Janotková E.

MALÁSEK, L. a E. JANOTKOVÁ. *Výzkum účinnosti odsávání zesíleného štěrbinového odsávacího systému*. 2004.

MALÁSEK, L. a E. JANOTKOVÁ. Study of reinforced exhaust slot system. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Indoor Air 2005: Vols I-5*. 2005, 3080-3083.

MALÁSEK, L. a E. JANOTKOVÁ. *Comparison of local exhaust systems capture efficiency*. 2006.

MAŠEK, J. *Vliv hustoty škodlivin na účinnost lokálního odsávání*. Brno, 2004, 43 s. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Janotková E.

MOLIN, D. *Rychlostní pole před zesíleným odsávacím nástavcem*. Brno, 2006, 51 s. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Janotková E.

NOVÁK, J. *Proudové pole zesíleného štěrbinového odsávacího systému*. Brno, 2005, 55 s. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Janotková, E.

PATOČKA, S. *Výzkum stavu prostředí při místním odsávání*. Brno, 2002. Dizertační práce. VUT v Brně. Školitel Janotková, E.



PATOČKA, S. a E. JANOTKOVÁ. Vývoj experimentálního zařízení pro výzkum lokálního odsávání škodlivin. In: *Proceedings of the Fluid Dynamics 2000*, Praha: Institute of Thermomechanics Academy of Sciences of the Czech Republic, 2000.

PATOČKA, S. a E. JANOTKOVÁ. Capture efficiency measurement of local reinforced exhaust system. In: *Proceedings of 8th International Conference on air Distribution in Rooms*, Copenhagen (Denmark), 2002, 681–684.

PATOČKA, S., E. JANOTKOVÁ a Pavelek M. *Development of measurement method for investigation of energy-saving ventilation*. In *Proceedings of the Proceedings of 12th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry (Thermo)*, Budapest (Hungary), 2001, 103–108.

PAVELEK, M. a J. ŠTĚTINA. *Experimentální metody v technice prostředí*. 3. vyd. Akademické nakladatelství CERM, 2007, 215 s. ISBN 9788021434264.

PAVLAS, D. *Výzkum účinnosti zesíleného odsávacího systému v kombinaci s pracovním stolem*. Brno, 2009, 58 s. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Janotková E.

PEDERSEN, L. G. *REEXS Reinforced Exhaust System*. Aarhus (Denmark), 1991. Dizertační práce. Danish Technological Institute.

PEDERSEN, L. G. a P. V. NIELSEN. *Exhaust System Reinforced by Jet Flow*. In *Proceedings of the Ventilation 91*, Cincinnati, Ohio (USA), 1991.

PERRY, R. H. a D. W. GREEN. *Perry's chemical engineers' handbook*. 7th ed. New York (USA): Chemical engineering (McGraw-Hill), 1997. ISBN 0070498415.

QUINTOT, M. E., G. AUBERTIN, J. FRUCHARD a L. ROURE. Captage des polluants au poste de travail. In: *Cahiers de notes documentaires*. Francie, 1977, 333–342.

RUEEGG, T., D. GUBLER, P. SPRECHER, A. MOSER a R. WEBER. Local capture of contaminants. *Ashrae Journal*. 2004, **46**(1), 26-29. ISSN 00012491.

RYDBERG, J. a E. KULMAR. Ventilationens effektivitet vid olika placering av inblasnings - och. *Sartryck ur tidskrift*. Švédsko, 1947.

SAFEX. *User guide - Nebelgerät fog generator 195 SG*. Germany: Günther schaidt - Safex-Chemie, 2010, 20 s.

SAUNDERS, C. J. a B. FLETCHER. Jet enhanced local exhaust ventilation. *Annals of Occupational Hygiene*. 1993, **37**(1), 15-24. ISSN 00034878.

SCHLICHTING, H. a K. GERSTEN. *Boundary-layer theory*. 9th rev. ed. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2017, 805 s. ISBN 9783662529171.

SLÁDEK, Z. a F. VDOLEČEK. *Technická měření*. Brno: VUTUM v Brně, 1992, ISBN 8021404140.

ŠÍP, J. *Měření účinnosti odsávání šterbinového zesíleného sacího nástavce v kombinaci s pracovním stolem*. Brno, 2016, 97 s. Bakalářská práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Pech O.

TESTO. *Hot ball probe instruction manual*. 2002.

THIEBAUT, D., G. AUBERTIN, L. ROURE, J. SERIEYS a D. MULLER. Le procede de captage des polluants a double flux. *Travail et securite*, 1983, 75–86.

WEN, X., G. R. HUNT a D. B. INGHAM. A boundary integral technique for the numerical modelling of the air flow for the Aaberg exhaust system. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2000, **24**(6), 477-484. ISSN 09557997.

WEN, X. a D. B. INGHAM. Theoretical and numerical predictions of two-dimensional Aaberg slot exhaust hoods. *Annals of Occupational Hygiene*. 2000, **44**(5), 375-390. ISSN 00034878.

WEN, X., D. B. INGHAM a B. FLETCHER. The numerical modelling of a two-dimensional local exhaust system associated with an inclined jet flow. *Journal of Engineering Mathematics*. 2002, **43**(2-4), 367-384. ISSN 00220833.

WINKLER, M. *Vliv polohy zesíleného štěrbinového sacího nástavce nad pracovním stolem na účinnost odsávání*. Pavelek, M. Brno, 2012, 93 s. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Pavelek M.

## 11 VLASTNÍ PUBLIKACE VZTAHUJÍCÍ SE K TÉMATU DIZERTAČNÍ PRÁCE

PECH, O., a M. PAVELEK. Influence of the workbench on the capture efficiency of pollutants of the Aaberg exhaust hood. *Annals of Faculty Engineering Hunedoara, – International Journal of Engineering*, 2014, **12**(2), s. 189-192. ISSN: 15842665.

PECH, O. *Výzkum efektivních způsobů větrání*. Pavelek, M. Brno: VUT v Brně, 2013, 39 s. Pojednání ke státní doktorské zkoušce. Školitel Pavelek M.

PECH, O., a M. PAVELEK. Capture efficiency measurement of pollutants over a workbench with the reinforced slot exhaust system. *EPJ Web of Conferences*, 2013a, (45), 1-4. ISSN: 2100-014X.

PECH, O. a M. PAVELEK. Investigation of the air flow field in front of the reinforced slot exhaust hood. In: *Proceedings of the 34th AIVC Conference, 3rd TightVent Conference, 2nd Cool Roofs' Conference, 1st venticool Conference: Energy conservation technologies for mitigation and adaptation in the built environment: the role of ventilation strategies and smart materials*. Athens (Greece): National & Kapodistrian university of Athens, 2013b, 418-424. ISBN: 9782930471426.

PECH, O., a M. PAVELEK. Capture efficiency of pollutants in a free space and over a workbench with reinforced slot exhaust systems. In: *ICCS 2012 International symposium on contamination control*. Zurich (Switzerland): Swiss Federal Institute of Technology ETH Zurich, 2012. 1-5.

PECH, O., a M. PAVELEK. Comparison of capture efficiency of pollutants over a workbench with traditional and reinforced slot exhaust systems. In: *Ventilation 2012 - The 10th International Conference on Industrial Ventilation*. Paris (Francie). 2012a, 1-5.

PECH, O., a M. PAVELEK. Úprava zařízení pro testování a výzkum sacích nástavců. In: *Sborník příspěvků 31. mezinárodní konference Setkání kateder mechaniky tekutin a termomechaniky*. Brno: VUT v Brně, 2012b, 177-180. ISBN: 9788021445291.

JANOTKOVÁ, E., O. PECH a M. PAVELEK. *Zařízení pro testování a výzkum sacích nástavců*. Brno: VUT v Brně. 2012. (funkční vzorek)

## 12 DALŠÍ VLASTNÍ PUBLIKACE

CALETKA, P., O. PECH, J. JEDELSKÝ, F. LÍZAL a M. JÍCHA. Comparison of methods for flow border detection in images of smoke visualization. In: *EPJ Web of Conferences*, 2016. 1-4. ISSN: 2100-014X.

CALETKA, P., O. PECH, J. JEDELSKÝ, M. JÍCHA a J. RICHTER. Comparison of Methods for Determination of Borders of Stream Visualized by Smoke Method. In: *34th Conference of Departments of Fluids Mechanics and Thermomechanics Proceedings of Extended Abstracts*. Ústí nad Labem: University J. E. Purkyně in Ústí nad Labem, 2015. 11-12. ISBN: 9788074149122.

PECH, O., J. JEDELSKÝ, P. CALETKA a M. JÍCHA. Visualization of the air flow behind the automotive benchmark vent. *EPJ Web of Conferences*. 2015. 1-4. ISSN: 2100-014X.

PEŠEK, M. a O. PECH. The determination of field usability of method measuring temperature fields in the air using an infrared camera. *EPJ Web of Conferences*. 2014. 1-4. ISSN: 2100-014X.

CHARVÁT, P., J. ŠTĚTINA, O. PECH, L. KLIMEŠ a M. OSTRÝ. Experimental investigation of stabilization of flowing water temperature with a water - PCM heat exchanger. *EPJ Web of Conferences*. 2014. ISSN: 2100-014X.

CHARVÁT, P., L. KLIMEŠ a O. PECH. Experimental and numerical study into solar air collectors with integrated latent heat thermal storage. In: *CESB 13 - Central Europe towards Sustainable Building*. Praha: Grada Publishing for Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague, 2013, s. 325-328. ISBN: 9788024750156.

CHARVÁT, P., O. PECH a J. HEJČÍK. Experimental investigations of the performance of a solar air collector with latent heat thermal storage integrated with the solar absorber. *EPJ Web of Conferences*, 2013, roč. 2013, č. 45, s. 1-4. ISSN: 2100-014X.

PECH, O. Simulace provozu solárních kolektorů. In: *Sborník příspěvků z konference 30. setkání kateder mechaniky tekutin a termomechaniky*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2011, s. 183-186. ISBN: 9788073727475.

JAROŠ, M., O. PECH a J. HRBATA. Optimalizace návrhu solárního kolektorového systému pomocí energetické simulace. In: *Sborník 6. konference IBPSA-CZ Simulace budov a techniky prostředí 2010*, Praha: IBPSA-CZ, 2010. s. 55-60. ISBN: 9788025486610.

PECH, O., P. CALETKA, J. JEDELSKÝ a M. JÍCHA. *Optimalizovaná výustka pro distribuci vzduchu*. Brno: VUT v Brně. 2017. (funkční vzorek)

PECH, O., M. ZÁVODNÍK, J. JEDELSKÝ a M. JÍCHA. *Benchmarková výustka*. Brno: VUT v Brně. 2015. (funkční vzorek)

JANOTKOVÁ, E., M. PAVELEK, P. KAMENSKÝ a O. PECH. *Zařízení s velkoplošnou výústkou pro generaci rovnoměrného proudu vzduchu*. Brno: VUT v Brně. 2011. (funkční vzorek)

## 13 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	Jednotka	Popis
$A_r$	[1]	Archimedovo číslo
$b$	[m]	šířka štěrby / šířka odsávací štěrby
$\bar{C}_{od}$	[ppm]	průměrná koncentrace stopového plynu v odsávaném vzduchu
$\bar{C}_{od,C}$	[ppm]	průměrná kombinovaná nejistota měření koncentrace stopového plynu v odsávaném vzduchu
$\bar{C}_{od,ref}$	[ppm]	průměrná koncentrace odpovídající zachycení 100 % stopového plynu při referenčním měření
$\bar{C}_{od,ref,C}$	[ppm]	průměrná kombinovaná nejistota měření koncentrace stopového plynu v odsávaném vzduchu při referenčním měření
$\bar{C}_{poz}$	[ppm]	průměrná koncentrace stopového plynu na pozadí
$\bar{C}_{poz,C}$	[ppm]	průměrná kombinovaná nejistota měření koncentrace stopového plynu na pozadí
$\bar{C}_{poz,ref}$	[ppm]	průměrná koncentrace stopového plynu na pozadí při referenčním měření
$\bar{C}_{poz,ref,C}$	[ppm]	průměrná kombinovaná nejistota měření koncentrace stopového plynu na pozadí při referenčním měření
$\bar{C}_{ref}$	[ppm]	průměrná referenční koncentrace odpovídající zachycení 100 % stopového plynu
$d$	[m]	průměr odsávacího otvoru
$D$	[m]	průměr otvoru
$g$	[m·s <sup>-2</sup> ]	tíhové zrychlení
$G$	[N·m <sup>-3</sup> ]	výsledná vztlačová síla na jednotku objemu
$G_g$	[N·m <sup>-3</sup> ]	tíhová síla na jednotku objemu
$G_{vz}$	[N·m <sup>-3</sup> ]	vztlačová síla na jednotku objemu
$I$	[1]	pracovní parametr
$I_{os}$	[1]	pracovní parametr pro osově symetrický proud
$I_{3D}$	[1]	pracovní parametr pro trojrozměrný proud
$I_{3D + stěna}$	[1]	pracovní parametr pro trojrozměrný proud se zadní stěnou
$k$	[1]	konstanta
$l_{od}$	[m]	délka odsávací štěrby
$l_{př}$	[m]	délka příváděcí štěrby
$L$	[m]	délka štěrby / charakteristický rozměr výustky
$\dot{m}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	hmotnostní průtok
$\dot{m}_{od}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	hmotnostní průtok odsávaného vzduchu
$\dot{m}_{od,š}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	hmotnostní průtok odsávané škodliviny
$\dot{m}_{př}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	hmotnostní průtok přiváděného vzduchu
$\dot{m}_{př,š}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	hmotnostní průtok generované škodliviny
$n$	[1]	exponent / počet opakovaných měření
$p$	[Pa]	tlak
$p_b$	[Pa]	barometrický tlak
$p_c$	[Pa]	celkový tlak (vůči okolí)
$p_d$	[Pa]	dynamický tlak
$p_s$	[Pa]	statický tlak (vůči okolí)
$p_0$	[Pa]	absolutní tlak vzduchu při kalibraci průtokoměru
$p_{0CO_2}$	[Pa]	absolutní tlak vzduchu při kalibraci průtokoměru

$p_1$	[Pa]	statický tlak v místě 1
$p_{1,c}$	[Pa]	celkový tlak v místě 1
$p_2$	[Pa]	statický tlak v místě 2
$p_{2,c}$	[Pa]	celkový tlaky v místě 2
$p_{1aCO_2}$	[Pa]	absolutní tlak stopového plynu před průtokoměrem
$p_{1aod}$	[Pa]	absolutní tlak odsávaného vzduchu před průtokoměrem
$p_{1apř}$	[Pa]	absolutní tlak přiváděného vzduchu před průtokoměrem
$p_{1od}$	[Pa]	podtlak odsávaného vzduchu před průtokoměrem
$p_{1př}$	[Pa]	přetlak přiváděného vzduchu před průtokoměrem
$P_z$	[J·s <sup>-1</sup> ]	ztrátový příkon
$r$	[m]	vzdálenost od propadu
$r_{vzd}$	[J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	měrná plynová konstanta vzduchu
$s$	[m]	šířka přiváděcí šterbiny
$t_{od}$	[°C]	teplota vzduchu v odsávacím potrubí před průtokoměrem
$t_{ok}$	[°C]	teplota okolí
$t_{1př}$	[°C]	teplota vzduchu v přiváděcím potrubí před průtokoměrem
$t_{1CO_2}$	[°C]	teplota stopového plynu před průtokoměrem
$t_{2CO_2}$	[°C]	teplota stopového plynu před všesměrovým zakončením
$t_{2př}$	[°C]	teplota přiváděného vzduchu v ústí přiváděcí šterbiny/dírek/trubiček
$T_p$	[%]	třída přesnosti
$T_{p,t}$	[%]	třída přesnosti termočlánků
$T_{p,pb}$	[Pa]	třída přesnosti barometru
$T_0$	[K]	teplota vzduchu při kalibraci průtokoměru (273,15 K)
$T_{0CO_2}$	[K]	teplota stopového plynu při kalibraci průtokoměru (298,15 K)
$T_{1CO_2}$	[K]	teplota stopového plynu před průtokoměrem
$T_{1od}$	[K]	teplota odsávaného vzduchu před průtokoměrem
$T_{1př}$	[K]	teplota přiváděného vzduchu před průtokoměrem
$T_{2od}$	[K]	teplota vzduchu na vstupu do odsávací šterbiny (teplota okolí)
$T_{2př}$	[K]	teplota vzduchu na výstupu z přiváděcí šterbiny
$\dot{V}$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	objemový průtok
$\dot{V}_{od}$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	objemový průtok vzduchu nuceně odváděného
$\dot{V}_{př}$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	objemový průtok vzduchu nuceně přiváděného
$\dot{V}_0$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	naměřený objemový průtok vzduchu průtokoměrem
$\dot{V}_{0CO_2}$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	naměřený objemový průtok stopového plynu průtokoměrem
$\dot{V}_{0od}$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	naměřený objemový průtok odsávaného vzduchu průtokoměrem
$\dot{V}_{0př}$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	naměřený objemový průtok přiváděného vzduchu průtokoměrem
$\dot{V}_1$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	objemový průtok vzduchu plovákovým průtokoměrem
$\dot{V}_{1CO_2}$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	objemový průtok stopového plynu průtokoměrem
$\dot{V}_{1od}$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	objemový průtok odsávaného vzduchu
$\dot{V}_{1př}$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	objemový průtok přiváděného vzduchu
$w$	[m·s <sup>-1</sup> ]	rychlost proudění / rychlost proudění v místně měření statického tlaku
$w_{od}$	[m·s <sup>-1</sup> ]	rychlost odsávaného vzduchu ve vstupním průřezu
$w_{př}$	[m·s <sup>-1</sup> ]	rychlost proudění vzduchu z přiváděcí šterbiny
$w_r$	[m·s <sup>-1</sup> ]	radiální rychlost do propadu
$w_x$	[m·s <sup>-1</sup> ]	osová rychlost ve vzdálenosti $x$ od příruby sacího nástavce
$w_{x,y,z}$	[m·s <sup>-1</sup> ]	složky rychlosti ve směru $x, y, z$
$W$	[1]	bezrozměrná rychlost směrem k odsávacímu otvoru

$W_x$	[1]	bezrozměrná rychlost kolmá na rovinu odsávacího otvoru
$W_y$	[1]	bezrozměrná rychlost rovnoběžná s rovinou odsávacího otvoru
$W_z$	[1]	bezrozměrná rychlost rovnoběžná s rovinou odsávacího otvoru
$x$	[m]	vzdálenost od příruby sacího nástavce
$X$	[1]	bezrozměrná vzdálenost podél osy $x$
$y$	[jednotka] <sup>12</sup>	naměřená hodnota
$y_i$	[jednotka]	naměřená hodnota $i$ -tého měření
$\bar{y}$	[jednotka]	průměrná hodnota z naměřených hodnot
$y^*$	[jednotka]	předpokládaná skutečná hodnota
$Y$	[1]	bezrozměrná vzdálenost podél osy $y$
$Y$	[jednotka]	měřicí rozsah přístroje
$Y_{pb}$	[Pa]	měřicí rozsah barometru
$Y_t$	[°C]	měřicí rozsah termočlánků
$Y_{\dot{V}_{ood}}$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	měřicí rozsah průtokoměru v odsávací větvi
$Y_{\dot{V}_{opř}}$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	měřicí rozsah průtokoměru v příváděcí větvi
$Y_w$	[m·s <sup>-1</sup> ]	měřicí rozsah anemometrů
$Z$	[1]	bezrozměrná vzdálenost podél osy $z$
$\alpha$	[°]	úhel mezi přívodní šterbinou a stolem
$\delta$	[1]	relativní nejistota
$\Delta\rho$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	rozdíl hustoty škodliviny a hustoty vzduchu
$\varepsilon$	[1]	součinitel větrací rovnováhy
$\varepsilon$	[jednotka]	absolutní nejistota
$\eta$	[1]	účinnost odsávání škodlivin
$\kappa$	[jednotka]	dovolená nejistota přístroje – krajní odchylka
$\kappa_{C_{od}}$	[%]	dovolená nejistota analyzátoru pro měření koncentrace stopového plynu v odsávaném vzduchu
$\kappa_{C_{od,ref}}$	[%]	dovolená nejistota analyzátoru pro měření referenční koncentrace stopového plynu v odsávaném vzduchu
$\kappa_{C_{poz}}$	[%]	dovolená nejistota analyzátoru pro měření koncentrace stopového plynu na pozadí
$\kappa_{C_{poz,ref}}$	[%]	dovolená nejistota analyzátoru pro měření koncentrace stopového plynu na pozadí při referenčním měření
$\kappa_s$	[m]	dovolená nejistota měřidla pro měření šířky šterbin
$\kappa_l$	[m]	dovolená nejistota měřidla pro měření délky šterbin
$\kappa_{\dot{V}_{ood}}$	[%]	dovolená nejistota průtokoměru v odsávací větvi
$\kappa_{\dot{V}_{opř}}$	[%]	dovolená nejistota průtokoměru v příváděcí větvi
$\kappa_w$	[m·s <sup>-1</sup> ]	dovolená nejistota anemometrů
$\nu$	[m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	kinematická viskozita
$\rho$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	hustota vzduchu v místně měření statického tlaku
$\rho$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	hustota / hustota škodliviny / hustota vzduchu
$\rho_{CO_2}$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	hustota stopového plynu
$\rho_p$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	hustota plováku
$\rho_0$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	hustota vzduchu při kalibraci
$\rho_1$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	hustota vzduchu při teplotě $T_I$ před průtokoměrem
$\rho_\infty$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	hustota vzduchu
$\sigma_A$	[jednotka]	výběrová směrodatná odchylka

<sup>12</sup> Jednotka zkoumané proměnné

$\sigma_{a,C}$	[jednotka]	směrodatná odchylky typu C veličiny $a$
$\sigma_B$	[jednotka]	nejistota typu B u přímých měření
$\sigma_{b,C}$	[m]	kombinovaná nejistota měření šířky odsávací štěrby
$\sigma_{b,C}$	[jednotka]	směrodatná odchylky typu C veličiny $b$
$\sigma_C$	[1]	kombinovaná nejistota typu C
$\sigma_{c,C}$	[jednotka]	směrodatná odchylky typu C veličiny $c$
$\sigma_{l_{od},C}$	[m]	kombinovaná nejistota měření délky odsávací štěrby
$\sigma_{l_{př},C}$	[m]	kombinovaná nejistota měření délky příváděcí štěrby
$\sigma_{s,C}$	[m]	kombinovaná nejistota měření šířky příváděcí štěrby
$\sigma_{y,C}$	[jednotka]	směrodatná odchylka typu C veličiny $y$
$\bar{\sigma}_A$	[jednotka]	výběrová směrodatná odchylka aritmetického průměru
$\bar{\sigma}_{I,C}$	[1]	průměrná kombinovaná nejistota nastavení pracovního parametru
$\bar{\sigma}_{p_{1aod},C}$	[Pa]	průměrná kombinovaná nejistota absolutního tlaku vzduchu v odsávacím potrubí před průtokoměrem
$\bar{\sigma}_{p_{1apř},C}$	[Pa]	průměrná kombinovaná nejistota absolutního tlaku vzduchu v příváděcím potrubí před průtokoměrem
$\bar{\sigma}_{p_{1od},C}$	[Pa]	průměrná kombinovaná nejistota měření podtlaku vzduchu v odsávacím potrubí před průtokoměrem
$\bar{\sigma}_{p_{1př},C}$	[Pa]	průměrná kombinovaná nejistota měření přetlaku vzduchu v příváděcím potrubí před průtokoměrem
$\bar{\sigma}_{t_{ok},C}$	[°C]	průměrná kombinovaná nejistota měření teploty okolí
$\bar{\sigma}_{t_{1od},C}$	[°C]	průměrná kombinovaná nejistota měření teploty vzduchu v odsávacím potrubí před průtokoměrem
$\bar{\sigma}_{t_{1př},C}$	[°C]	průměrná kombinovaná nejistota měření teploty vzduchu v příváděcím potrubí před průtokoměrem
$\bar{\sigma}_{t_{2př},C}$	[°C]	průměrná kombinovaná nejistota měření teploty příváděného vzduchu v ústí štěrbinové výustky
$\bar{\sigma}_{\dot{V}_{1od},C}$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	průměrná kombinovaná nejistota skutečného odsávaného objemového průtoku vzduchu
$\bar{\sigma}_{\dot{V}_{1př},C}$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	průměrná kombinovaná nejistota skutečného příváděného objemového průtoku vzduchu
$\bar{\sigma}_{\Delta p_{od},C}$	[Pa]	průměrná kombinovaná nejistota měření diferenčního tlaku v odsávací části nástavce
$\bar{\sigma}_{\Delta p_{př},C}$	[Pa]	průměrná kombinovaná nejistota měření diferenčního tlaku v příváděcí části nástavce
$\bar{\sigma}_{\eta,C}$	[%]	průměrná kombinovaná nejistota účinnosti odsávání
$\tau$	[s]	čas